

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ

Утверждено
редакционно-издательским советом института
в качестве методических указаний
к лабораторной работе для студентов

КУЙБЫШЕВ 1987 г.

Рассмотрены физические принципы работы полупроводниковых термоэлементов (эффект Пельтье) и вопросы создания на их основе полупроводниковых холодильников.

Приведена методика экспериментального исследования промышленных образцов полупроводниковых холодильников.

Рекомендуется для студентов специальности 0705.

Составитель: канд. техн. наук, доцент А. Г. Саноян

Рецензенты: Е. Г. Гусева, доц., к. ф. м. н.;

В. Д. Дмитриев, доц., к. т. н.

Цель работы — изучение физической сущности эффекта Пельтье и возможности его использования при создании термоэлектрических холодильников.

Задания:

1. Определить зависимость между изменением температуры спая термоэлемента и силой электрического тока, протекающего через него.

2. Дать теоретическую интерпретацию полученным экспериментальным результатам.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ЭФФЕКТА ПЕЛЬТЬЕ

В отсутствие электрического поля электроны в проводящих материалах (металлы, полупроводники) совершают хаотическое (тепловое) движение со средней скоростью U_T , определяемой из выражения

$$\frac{mU_T}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

В присутствии электрического поля электроны, помимо тепловой скорости U_T , обладают скоростью направленного движения U_E , которая, собственно говоря, и реализует электрический ток. Величина дрейфовой скорости U_E определяется согласно выражению

$$U_E = \mu \cdot E, \quad (2)$$

где μ — подвижность электрона, определяемая как скорость направленного движения электрона при $E = 1 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$, E — напряженность электрического поля. (Следует отметить, что для типичных значений E выполняется условие $U_T \gg U_E$).

Выражение (2) характеризует среднюю скорость направленного движения электронов. В действительности же направленное

перемещение электрона представляет собой непрерывное чередование элементарных актов ускорения в пределах длины свободного пробега и торможения в результате взаимодействия с атомами кристаллической решетки проводника. В процессе торможения происходит передача энергии направленного движения электрона кристаллической решетке и, как следствие, ее разогрев. Последнее можно описать в рамках макроскопических представлений в виде

$$Q_D = I^2 R, \quad (3)$$

где Q_D — теплота Джоуля-Ленца, выделяемая в проводнике в результате токопрохождения; I — величина электрического тока; R — сопротивление проводника.

В свете вышесказанного эффект разогрева проводников электрическим током представляется едва ли не тривиальным, и тем более неожиданным представляется изыскание возможности достижения обратного эффекта — охлаждения проводника. Поскольку повсеместное охлаждение проводника связано с нарушением закона сохранения энергии, речь может идти об охлаждении некоторой части замкнутой проводящей цепи (локальное охлаждение). Последнее можно осуществить на основании следующего модельного представления.

Выражение (1) характеризует среднюю энергию поступательного движения совокупности электронов проводимости. В то же время, согласно основным результатам статистической физики (1), в общей совокупности электронов присутствуют и такие электроны, тепловая энергия которых существенно отличается от средней в сторону больших и меньших значений. Если в некоторой области проводника добавить своеобразное «энергетическое сито», которое пропускало бы через себя только высокоэнергетические («горячие») электроны и препятствовало бы оттоку низкоэнергетических («холодных») электронов, то в этой области наблюдалось бы «охлаждение» электронного газа.

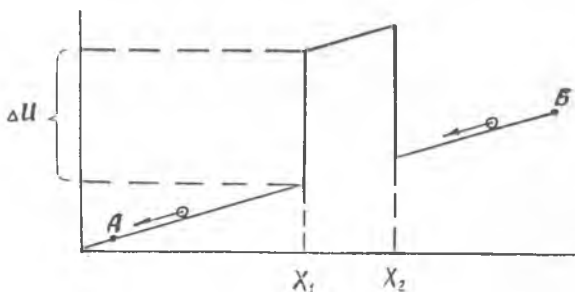


Рис. 1. К обоснованию возможности термоэлектрического охлаждения

В свою очередь, «холодный» электронный газ, взаимодействуя с кристаллической решеткой проводника, приведет к охлаждению последней. На рис. 1 представлена энергетическая диаграмма элемента проводящей цепи, способного реализовать эффект охлаждения. (Наклонный характер отрезка AB свидетельствует о наличии между точками A и B разности потенциалов, создаваемой внешним источником). Электроны проводимости «скатываются» от точки B к потенциальному барьеру ΔU . Наиболее «горячие» из них преодолевают барьер и в дальнейшем беспрепятственно перемещаются к точке A . Таким образом, в точке x_2 имеется избыточная концентрация «холодных» электронов, охлаждающих кристаллическую решетку. В точке x_1 наблюдается обратная ситуация — избыточная концентрация «горячих» электронов, вызывающая разогрев этой области кристаллической решетки.

Количество теплоты, выделившееся в точке x_1 или поглощенное от кристаллической решетки в точке x_2 (тепло Пельтье), в первом приближении оценивается выражением

$$Q_{\text{п}} = \Pi \cdot I \cdot t, \quad (4)$$

где Π — коэффициент Пельтье; t — продолжительность токопрохождения.

Для создания устройства, обладающего энергетической диаграммой, представленной на рис. 1, необходимо пропустить ток через контакт двух разнородных материалов.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТЕРМОЭЛЕМЕНТЫ

Если измерять $Q_{\text{п}}$ в джоулях, а q в кулонах, то Π будет выражено в Дж/К, т. е. в вольтах. Опыт показывает, что для большинства различных пар металлов коэффициент Пельтье имеет величину порядка $10^{-2} \dots 10^{-3}$ В. Для полупроводниковых пар или пар типа «металл-полупроводник» величина Π может быть на несколько порядков выше величины Π для металлических пар.

Рассмотрим эффект Пельтье для нейтральной контактной пары «полупроводник-металл». (Нейтральным называется контакт двух материалов, обладающих одинаковыми работами выхода электронов. В этом случае на энергетической диаграмме отсутствует изгиб зон).

Энергетическая диаграмма нейтрального контакта представлена на рис. 2. Ввиду высокой проводимости металлов падение напряжения на них чрезвычайно мало, а следовательно, незначителен и наклон энергетических уровней. Поэтому он не отражен на энергетической диаграмме (рис. 2, б). Контакт, расположенный справа, будет охлаждаться, слева — нагреваться.

Нетрудно заметить, что рассмотренная система является обратной. При перемене направления тока охлаждающий и нагревающий контакты меняются местами.

Эффективность термоэлемента тем выше, чем выше коэффициент Пельтье и электропроводность используемых материалов (объяснить, почему). В свою очередь, значение коэффициента Пельтье определяется величиной потенциального барьера (объяснить, почему как малая, так и большая величина барьера не являются оптимальными).

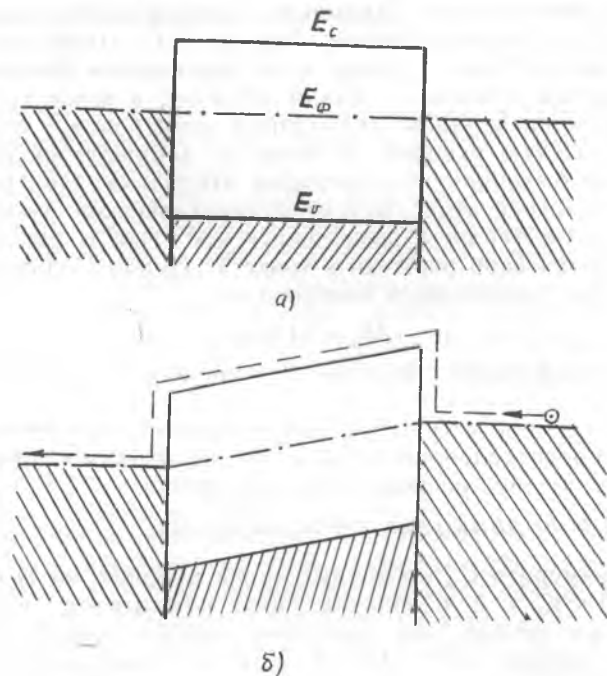


Рис. 2. Энергетическая диаграмма полупроводникового термоэлемента в отсутствии (а) и присутствии электрического поля (б)

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХОЛОДИЛЬНИКИ

Исследуем тепловой баланс термоэлемента с учетом теплоты Джоуля-Ленца и Пельтье. Допустим, что полное сопротивление горячего и холодного спаев термоэлемента равно R . Тогда теплота Джоуля-Ленца, выделяющаяся на холодном спае термоэлемента,

$$Q_{\text{в}} = \frac{I^2 R}{2} . \quad (5)$$

Теплота Пельтье, отбираемая от кристаллической решетки термоэлемента в окрестности холодного спая, определяется выражением (4). Уравнение теплового баланса в окрестности холодного спая имеет вид

$$Q = Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}}. \quad (6)$$

С учетом выражений (4) и (5) уравнение (6) примет вид

$$Q = \frac{I^2 R}{2} - I \cdot \Pi, \quad (7)$$

где Q — суммарное выделение (поглощение) тепла в окрестности холодного спая.

Очевидно, что термоэлемент будет обладать холодильным эффектом при выполнении условия $Q < 0$. График зависимости Q от величины тока I представлен на рис. 3. Из общего вида графической зависимости следует, что существует оптимальное значение $I_{\text{опт}}$ тока, при котором холодильный эффект достигает своего максимального значения $Q_{\text{опт}}$. Для определения $Q_{\text{опт}}$ исследуем выражение (7) на экстремум.

$$\frac{dQ}{dI} = R \cdot I - \Pi = 0. \quad (8)$$

откуда следует, что $I_{\text{опт}} = \Pi/R$, что соответствует $Q_{\text{опт}} = -\Pi^2/2R$.

Более строгое рассмотрение оптимального режима эксплуатации термоэлемента учитывает влияние обратного теплового потока (от горячего спая к холодному). Для уменьшения этого потока используется принудительное охлаждение горячего спая.

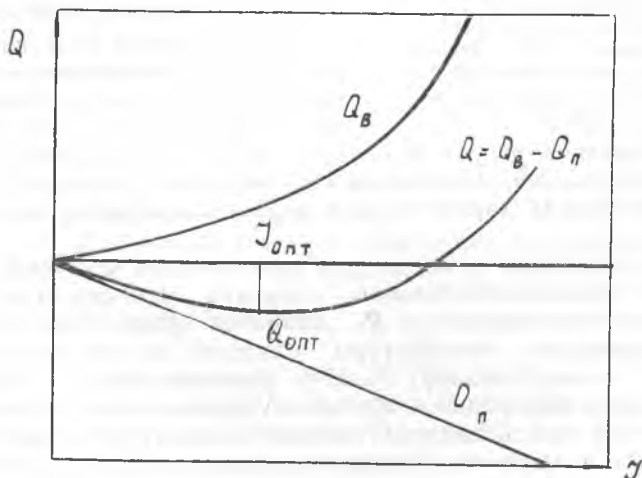


Рис. 3. Зависимость холоодильного эффекта от величины тока, протекающего через спай

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО
ТЕРМОЭЛЕМЕНТА (ХОЛОДИЛЬНИКА)

Схема установки для исследования эффекта Пельтье и изучения конструкции полупроводникового термоэлектрического холодильника приведена на рис. 4. Установка состоит из следующих частей:

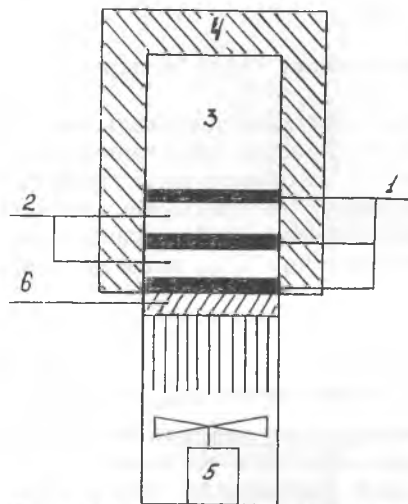


Рис. 4. Схематическое изображение термохолодильника:

1 — металлические обкладки; 2 — полупроводник; 3 — полезный объем; 4 — теплоизолятор; 5 — вентилятор; 6 — радиатор охлаждения

до 9 А. Позиции регулятора тока термоэлементов снабжены цифровой индикацией. Интенсивность свечения лампочки «индикатора перегрузки» характеризует режим нагружения термоэлементов.

Блок индикации температуры выполнен по мостовой схеме. В качестве термочувствительного элемента используется полупроводниковый терморезистор R_t . Диапазон измеряемых температур блока индикации температуры разделен на два поддиапазона: 10...30°C (синяя шкала); 2...10°C (красная шкала). Переход от одной шкалы измерения к другой осуществляется с помощью «переключателя шкалы температур» при температуре термостата 10°C. В процессе измерения показания измерительного прибора (μ А) переводятся в °С с помощью калибровочных кривых, различных для обоих поддиапазонов.

Полупроводникового термоэлемента с теплоизолированной рабочей камерой и системой воздушного охлаждения горячего спая;

регулируемого блока питания термоэлемента;

блока индикации температуры.

Для усиления эффекта охлаждения конструкция холодильника выполнена по «двухэтажной» схеме, т. е. холодный спай нижнего термоэлемента охлаждает горячий спай верхнего термоэлемента. Термоэлементы соединены между собой последовательно. В целях достижения наглядности конструкции у обоих термоэлементов (нижнего и верхнего) отсутствуют термоизоляции, что существенно снижает их эксплуатационные возможности.

Регулируемый блок питания термоэлемента позволяет ступенчато изменять ток, протекающий через термоэлементы, в пределах от 2

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с принципом работы экспериментальной установки.

2. Выключить все блоки установки.

3. Установить переключатель регулятора тока термоэлемента в крайнее левое положение.

4. Включить блок индикации температуры и зафиксировать начальную температуру термоэлемента.

5. Включить блок питания термостата, при этом должна загореться позиция «0».

6. Переключить регулятор тока в позицию «1» и зафиксировать показания индикатора тока.

7. По истечении времени установления теплового равновесия (5... 10 мин.) зафиксировать показания индикатора температуры.

8. Произвести измерения согласно п. 7 для всех остальных позиций регулятора тока термоэлемента.

В н и м а н и е!

При выходе из строя вентилятора немедленно отключить установку от сети.

ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

По результатам эксперимента каждым студентом оформляется отчет. Отчет должен содержать:

изложение цели работы;

экспериментальные результаты в виде табличных материалов (№ позиции, ток термоэлемента, температура термостата);

график экспериментальной зависимости с указанием поля погрешности измерения;

описание и схему экспериментальной установки;

выводы по полученным результатам;

литературу, использованную при проведении исследования.

ВОПРОСЫ К КОЛЛОКВИУМУ

1. В чем состоит проявление эффекта Пельтье?

2. Какова разница между теплом Пельтье и Джоуля-Ленца?

3. Что характеризует коэффициент Пельтье?

4. Какова размерность коэффициента Пельтье?

5. Каков порядок величин коэффициента Пельтье у металлических и полупроводниковых спаев?

6. В чем состоит физическая сущность эффекта Пельтье?

7. Объяснить сущность эффекта Пельтье для спая, образованного электронным и дырочным полупроводниками.

8. Что следует понимать под оптимальным током при рассмотрении эффекта Пельтье?

9. Какие факторы ограничивают уменьшение температуры холодного спая при проявлении эффекта Пельтье?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Епифанов Г. И., Мома Ю. А. Физические основы конструирования и технологии РЭА и ЭВА.—М.: Сов. радио, 1979, 354 с.

Составитель Ашот Геворкович Саноян

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ

Редактор А. П. Захардяева
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор В. Т. Борисова

Подписано в печать 4.06.87 г.
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная белая.
Усл. п. л. 0,46. Уч.-изд. л. 0,4. Печать высокая.
Литературная гарнитура. Т. 500 экз. Заказ № 541.
Бесплатно.
Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт им. акад. С. П. Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Тип. ЭОЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.