

1.20. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

Цель лекции: ознакомление с основными термоэлектрическими эффектами в полупроводниках.

1.20.1. ЭФФЕКТ ЗЕЕБЕКА

К термоэлектрическим явлениям относятся три эффекта: эффект Зеебека, эффект Пельтье и эффект Томсона.

Эффект Зеебека, или термоэлектрический эффект, был открыт в 1821 г. немецким физиком Т.И. Зеебеком (Thomas Johann Seebeck). Данный эффект заключается в возникновении электродвижущей силы (ЭДС) в замкнутой электрической цепи, состоящей из одного или нескольких последовательно соединенных разнородных проводников, грани которых находятся при различных температурах (рис. 1.105).

Появление ЭДС обусловлено разным уровнем Ферми в различных материалах. При их соприкосновении уровень Ферми выравнивается (в одном материале понижается, в другом — повышается). Этот процесс происходит за счет перехода электронов через контакт, что и приводит к появлению ЭДС. Следует отметить, что значение ЭДС невелико (порядка нескольких десятых долей вольта). В небольшом интервале температур термоЭДС E можно считать пропорциональной разности температур T_2 и T_1 :

$$E = \alpha_{12}(T_2 - T_1),$$

где $\alpha_{1,2}$ — коэффициент термоЭДС.

Значение коэффициента термоЭДС зависит от природы контактирующих материалов. Для металлов эти значения равны единицам и десяткам мкВ/К, для полупроводников они составляют сотни мкВ/К. Полупроводники

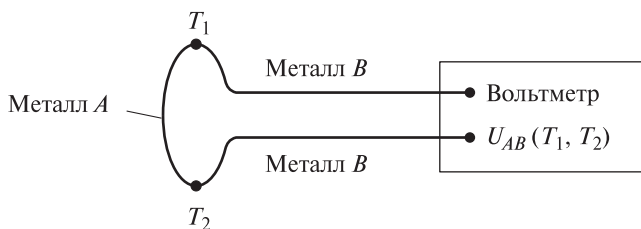


Рис. 1.105. Схема измерения термоЭДС:
 T_1, T_2 — различные температуры

обладают на порядок большей термоэлектрической силой, чем металлы. Это обусловлено более сильной зависимостью характеристик полупроводников от температуры (проводимость, концентрация носителей заряда); КПД эффекта Зеебека является чрезвычайно низким (порядка 10 %).

Эффект Зеебека используют в термопарах для измерения температур разных объектов, также применяют для измерения плотности лучистой (электромагнитной) энергии.

На космических аппаратах эффект Зеебека применяется для генерации электричества. В запускаемых зондах для исследования окраин нашей Солнечной системы или космоса за ее пределами используется эффект Зеебека для питания электронных устройств, находящихся на их борту. Это стало возможным благодаря радиационному термоэлектрическому генератору.

1.20.2. ЭФФЕКТ ПЕЛЬТЬЕ

Эффект Пельтье заключается в нагревании одного контакта и охлаждении другого, если рассмотренную выше цепь подсоединить к внешнему источнику тока, т. е. эффекты Зеебека и Пельтье являются противоположными. Эффект Пельтье открыт в 1834 г. французским физиком Ж.Ш. Пельтье (Jean-Charles Peltier).

Значение перемещенной энергии и направление ее переноса зависят от вида контактирующих веществ и от направления и силы протекающего электрического тока:

$$Q = Pit,$$

где Q — количество выделенного или поглощенного количества теплоты; P — коэффициент Пельтье; I — сила тока; t — время протекания тока.

Эффект Пельтье более заметен у полупроводников, это свойство используется в элементах Пельтье (рис. 1.106).

Эффект Пельтье объясняется следующим образом. При контактировании двух разнородных веществ появляется контактная разность потенциалов, которая создает внутреннее контактное электрическое поле. Если через контакт

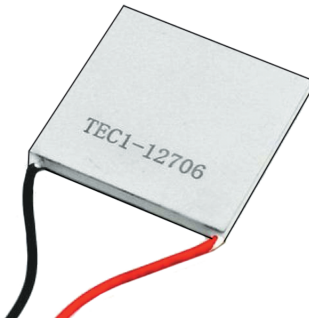


Рис. 1.106. Элемент Пельтье (термоэлектрический модуль)

протекает электрический ток, то это поле будет либо способствовать, либо препятствовать прохождению тока. Если ток преодолевает контактное поле, то внешний источник питания затрачивает дополнительную энергию, которая выделяется в контакте, что приводит к его нагреву. Если же ток идет таким образом, что поддерживается контактным полем, то оно и совершает работу по перемещению зарядов. Необходимая для этого энергия отбирается у вещества, что приводит к его охлаждению в месте контакта.

Основные направления практического использования эффекта Пельтье в полупроводниках — получение холода для создания термо-

электрических охлаждающих устройств, подогрев для целей отопления, термостатирование, управление процессом кристаллизации в условиях постоянной температуры. При пропускании тока через элемент Пельтье одна его сторона будет нагреваться, а другая охлаждаться.

1.20.3. ЭФФЕКТ ТОМСОНА

Эффект открыт У. Томсоном в 1851 г. и относится к термоэлектрическим эффектам. При пропускании электрического тока через проводник или полупроводник, вдоль которого существует градиент температуры (рис. 1.107), в нем, кроме джоулевой теплоты, в зависимости от направления тока будет выделяться или поглощаться дополнительное количество теплоты (теплота Томсона). Количество теплоты Томсона пропорционально силе тока, времени и перепаду температур, зависит от направления тока. Объяснение эффекта заключается в следующем. В условиях, когда вдоль проводника, по которому протекает ток, существует градиент температуры, причем направление тока соответствует движению электронов от горячего конца проводника к холодному, при переходе из более горячего сечения в более холодное электроны передают избыточную энергию окружающим атомам (выделяется теплота), а при обратном направлении тока, проходя из более холодного участка в более горячий, пополняют свою энергию за счет окружающих атомов (теплота поглощается).

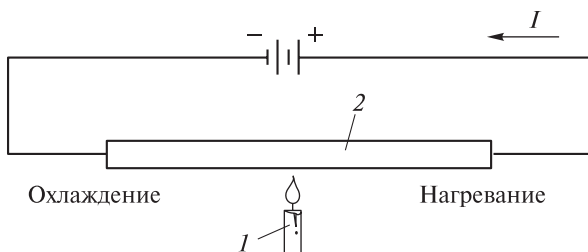


Рис. 1.107. К объяснению эффекта Томсона:

1 — нагреватель; 2 — металлический проводник

В полупроводниках важным является то, что концентрация носителей в них значительно зависит от температуры. Если полупроводник нагрет неравномерно, то концентрация носителей заряда в нем будет больше там, где выше температура, поэтому градиент температуры приводит к градиенту концентрации, вследствие чего возникает диффузионный поток носителей заряда. Это приводит к нарушению электронейтральности. Разделение зарядов порождает электрическое поле, препятствующее разделению. Таким образом, если в полупроводнике имеется градиент температуры, то в нем имеется объемное электрическое поле $E_{об}$.

Предположим, что через такой образец пропускают электрический ток под действием внешнего электрического поля $E_{вн}$. Если ток идет против внут-

ренного объемного поля $E_{об}$, то внешнее поле совершает дополнительную работу при перемещении зарядов относительно поля $E_{об}$, что приведет к выделению количества теплоты, дополнительного к ленц-джоулевым потерям. Если ток (или внешнее поле $E_{вн}$) направлен по объемному полю $E_{об}$, то это поле совершает работу по перемещению зарядов для создания тока. В данном случае внешний источник тратит меньшую энергию для поддержания тока, чем в том случае, когда внутреннего поля $E_{об}$ нет. Работа поля $E_{об}$ может совершаться только за счет тепловой энергии самого проводника, поэтому он охлаждается. Явление выделения или поглощения теплоты в проводнике, обусловленное градиентом температуры, при прохождении тока называется эффектом Томсона. Теплота Томсона (Q_m) пропорциональна плотности тока (J), времени (t) и перепаду температур вдоль проводника (ΔT):

$$Q_m = \tau \Delta T J t,$$

где τ — коэффициент Томсона, зависящий от свойств материала.

Таким образом, вещество нагревается, когда поля $E_{вн}$ и $E_{об}$ противоположно направлены, и охлаждается, когда их направления совпадают.

Тесты к лекции 1.20

1. В чем заключается эффект Зеебека?

а) в возникновении ЭДС в замкнутой электрической цепи, состоящей из одного или нескольких последовательно соединенных разнородных проводников, грани которых находятся при различных температурах;

б) в аномальном повышении сопротивления места контакта двух проводников при их нагреве;

в) в нагреве одного проводника и охлаждении другого при пропускании через их контакт электрического тока.

2. Что является причиной возникновения эффекта Зеебека?

а) разный уровень Ферми в разных материалах;

б) разный уровень проводимости контактируемых материалов;

в) различная плотность фононного газа.

3. От чего зависит значение коэффициента термоЭДС?

а) от природы контактирующих материалов;

б) от температуры;

в) от значения проходящего тока.

4. Какое примерно значение имеет КПД эффекта Зеебека?

а) 10 %;

б) 20 %;

в) 30 %.

5. В чем заключается эффект Пельтье?

а) в нагревании одного контакта и охлаждении другого, если через замкнутую цепь двух или более контактов разнородных проводников пропустить электрический ток;

б) в возникновении ЭДС в замкнутой цепи двух контактов разнородных проводников при их нагреве;

в) в аномальном падении сопротивления в месте контакта двух разнородных проводников при охлаждении.

6. В чем заключается эффект Томсона?

а) при пропускании электрического тока через проводник или полупроводник, вдоль которого существует градиент температуры, в нем кроме джоулевой теплоты в зависимости от направления тока будет выделяться или поглощаться дополнительное количество теплоты;

б) при пропускании электрического тока через два проводника или полупроводника, расположенных параллельно друг другу, между ними возникает сила отталкивания или притяжения в зависимости от направления тока;

в) при пропускании электрического тока через два проводника или полупроводника, расположенных перпендикулярно друг другу, между ними возникает сила отталкивания или притяжения в зависимости от направления тока.

7. От каких параметров зависит количество теплоты Томсона?

а) от силы тока, времени, перепада температур, направления тока;

б) от вида контактируемых материалов;

в) от сопротивления материала.