

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Ниже приведены методические указания по выполнению лабораторных работ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА

Цель лабораторной работы: изучение методики экспериментального определения ширины запрещенной зоны полупроводников на основе исследования температурной зависимости электропроводности.

Задание по лабораторной работе.

1. Получить задание.
2. Определить ширину запрещенной зоны полупроводника.
3. Проанализировать результаты лабораторной работы, сформулировать краткие выводы.

Теоретическая часть

В изолированных атомах электроны могут находиться только в определенных квантовых состояниях и на определенных энергетических уровнях. Разрешенные уровни энергии отделены друг от друга областями запрещенных энергий.

В твердых телах атомы находятся на относительно небольшом расстоянии друг от друга и взаимодействие между атомами достигает значительной величины. В результате электроны каждого атома оказываются в электрическом поле не только своего атомного ядра, но и во внешнем поле соседних ядер (рис. 2.1).

Такие энергетические взаимодействия приводят к расщеплению уровней энергии электронов и образованию энергетической зоны, состоящей из дискретных подуровней, на каждом из которых может находиться по два электрона. Зоны разрешенных энергий отделяются друг от друга зонами запрещенных энергий (запрещенными зонами).

В зависимости от степени заполнения зон электронами и шириной запрещенной зоны ΔE возможны четыре случая заполнения зон электрона (рис. 2.2).

Энергетическая зона, образованная из энергетических уровней внешних валентных электронов атомов, называется валентной зоной. Выше валент-

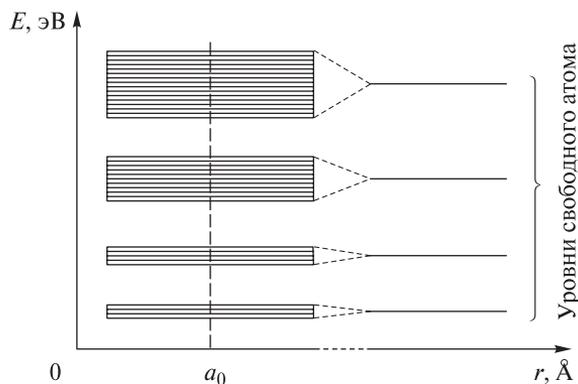


Рис. 2.1. Схема возникновения зон энергии из энергетических уровней атома при их сближении (образовании твердого тела) (a_0 — расстояние между атомами твердого тела)

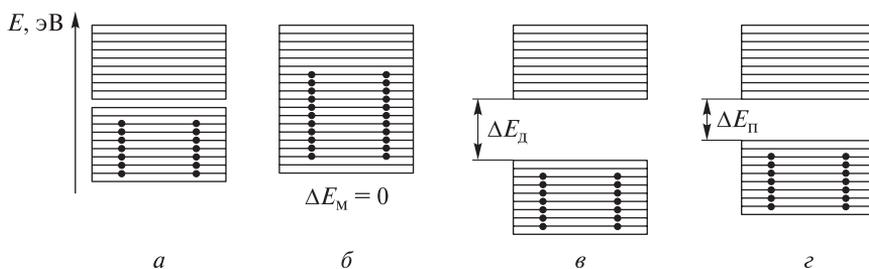


Рис. 2.2. Случаи заполнения зон электронами:

a — валентная зона полностью заполнена электронами, зона проводимости пуста; *б* — валентная зона заполнена полностью, но перекрывается с зоной проводимости; *в* — валентная зона полностью заполнена электронами, зона проводимости пуста и между ними находится широкая запрещенная зона более 3 Эв; *г* — валентная зона полностью заполнена электронами, зона проводимости пуста и между ними находится неширокая запрещенная зона менее 3 Эв

ной зоны в энергетическом спектре электронов располагаются зоны, образованные из пустых энергетических уровней атомов (зоны проводимости).

В общем случае валентная зона полностью заполнена электронами, а зона проводимости пуста (рис. 2.2, *a*, *в*, *г*). В зависимости от ширины запрещенной зоны ΔE твердые тела, имеющие такое зонное строение, являются проводниками, диэлектриками или полупроводниками.

Валентная зона заполнена полностью, но перекрывается с зоной проводимости (рис. 2.2, *б*). В этом случае электроны могут легко переходить на энергетические уровни зоны проводимости и участвовать в электропроводности. Это характерно для металлов.

Если ширина запрещенной зоны $\Delta E_{\text{д}}$ намного больше энергии теплового движения электронов, определяемой температурой, то электроны не могут

перейти в зону проводимости (т. е. для перехода в зону проводимости тепловой энергии электронов оказывается недостаточно). Такой кристалл является диэлектриком (рис. 2.2, в). Если запрещенная зона $\Delta E_{\text{п}}$ достаточно узкая, так что переброс электронов из валентной зоны в зону проводимости может быть осуществлен сравнительно легко даже путем теплового возбуждения, то кристалл является полупроводником (рис. 2.2, г).

Электроны в полупроводниках могут осуществлять переход из валентной зоны в зону проводимости из-за относительно небольшой ширины запрещенной зоны ΔE_g ($\Delta E_g < 3$ эВ). Такой переход возможен в результате воздействия внешнего электрического поля, тепловой и световой энергий, ионизирующего излучения и т. п.

В этом случае в валентной зоне возникает свободный энергетический уровень, в зоне проводимости появляется свободный электрон. Незанятое электроном энергетическое состояние в валентной зоне называется *дыркой*, а процесс — генерацией пары носителей зарядов. Генерация носителей зарядов приводит к тому, что электроны могут перемещаться в зоне проводимости, переходя на близлежащие свободные энергетические уровни, а дырки — в валентной зоне, что эквивалентно перемещению положительных зарядов, равных по абсолютной величине зарядам электронов. Перемещение дырки можно представить как заполнение свободных энергетических уровней в валентной зоне электронами близлежащих занятых энергетических уровней.

Электропроводность, обусловленная генерацией пар носителей заряда электрон—дырка, называется собственной проводимостью. Процесс возвращения возбужденных электронов из зоны проводимости в валентную зону, в результате которого пара носителей заряда электрон—дырка исчезает, называется рекомбинацией. Оба процесса — генерация и рекомбинация пар носителей заряда — происходят одновременно, вследствие чего в полупроводнике устанавливается динамическое равновесие, определяющее равновесную концентрацию электронов и дырок. Чем выше температура, тем больше равновесная концентрация, поэтому с повышением температуры удельная проводимость полупроводника должна увеличиваться.

В запрещенной зоне полупроводника возможно расположение энергетических уровней, обусловленных нарушением периодичности кристаллической решетки и называемых локальными уровнями. Локальные уровни, обусловленные примесью, называются примесными. Эти уровни размещаются вблизи как зоны проводимости, так и валентной зоны. В первом случае вероятен переход электрона с занятого примесного уровня в зону проводимости. Такой тип дефекта кристаллической решетки называется *донором*, а создающая его примесь — *донорной*. Во втором случае вероятен переход (захват) электрона из валентной зоны на незанятый примесный уровень и образование дырки проводимости. Дефект кристаллической решетки подобного типа называется акцептором, а соответствующая ему примесь — акцепторной. Электропроводность полупроводника, обусловленная ионизацией атомов акцепторной или донорной примесью, называется примесной электропроводностью. В зависимости от типа примеси возможна электронная или дырочная электропроводность, обусловленная соответственно перемещением электронов и дырок.

Следует отметить, что примесная электропроводность зависит от температуры так же, как и собственная электропроводность.

В примесных полупроводниках наряду с примесной электропроводностью существует собственная проводимость. В собственном полупроводнике концентрации электронов и дырок равны. В примесном полупроводнике преобладает концентрация электронов (для донорной примеси) или дырок (для акцепторной примеси). Подвижные носители зарядов с преобладающей концентрацией называются основными. Так, в полупроводнике с донорной примесью основные носители заряда — электроны, поэтому его называют полупроводником *n*-типа (от англ. *negative* — отрицательный). Дырки в таком полупроводнике являются неосновными носителями заряда. В полупроводнике с акцепторной примесью основные носители зарядов — дырки, поэтому его называют полупроводником *p*-типа (от англ. *positive* — положительный). В этом случае электроны являются неосновными носителями заряда.

Концентрация основных носителей заряда определяет удельную электрическую проводимость полупроводника: чем выше концентрация, тем больше удельная электрическая проводимость.

Температурная зависимость электропроводности полупроводника определяется температурной зависимостью как концентрации носителей заряда, так и их подвижности.

В общем случае удельная электропроводность полупроводника

$$\sigma = N_0 e \mu \text{ [Ом/м]},$$

где N_0 — концентрация носителей заряда; e — заряд электрона; μ — подвижность носителей заряда.

Под подвижностью понимают дрейфовую скорость частиц V_D в электрическом поле напряженностью $E = 1 \text{ [В/см]}$, т. е.

$$\mu = V_D / E \text{ [м}^2\text{/(В} \cdot \text{с)]}.$$

В полупроводнике под влиянием внешнего электрического поля дрейфовое движение совершают как электроны, так и дырки. Несмотря на то что электроны и дырки движутся в противоположных направлениях, так как их заряды противоположны по знаку, направления электронной и дырочной составляющих дрейфового тока совпадают.

Поэтому для собственного полупроводника плотность дрейфового тока

$$j = j_n + j_p = eE(N_i \mu_n + P_i \mu_p) \text{ [А/м}^2\text{]},$$

где N_i , μ_n , P_i , μ_p — концентрации и подвижности электронов и дырок соответственно.

Собственная электропроводность

$$\sigma = eN_i \mu_n + eP_i \mu_p.$$

Концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике, как отмечалось выше, $N_i = P_i$ и определяются по формуле

$$N_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp(-\Delta E_g / 2kT) \text{ [1/м}^3\text{]},$$

где N_c, N_v — эффективные плотности квантовых состояний в зоне проводимости и валентной зоне соответственно; k — постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ [Дж/К].

Подвижность носителей заряда в значительно меньшей степени зависит от температуры по сравнению с температурной зависимостью их концентрации. Поэтому можно считать, что электропроводность полупроводника растет с температурой примерно по тому же закону, что и концентрация электронов и дырок:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E_0 / 2kT) [1/\text{м}^3],$$

где σ_0 — электропроводность при $T \Rightarrow \infty$; ΔE_0 — термическая ширина запрещенной зоны.

Понятие *термической ширины запрещенной зоны* обусловлено тем, что при определении этого фундаментального параметра полупроводника не учитывается реальная температурная зависимость подвижности электронов и дырок, а также зависимость самой ширины запрещенной зоны от температуры.

Если прологарифмировать выражение для σ , то оно примет вид

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - (\Delta E_0 / 2k) [1/T].$$

В координатах $\ln \sigma - 1/T$ эта зависимость имеет вид прямой с углом наклона, тангенс которого пропорционален $\Delta E_0 / 2k$ (рис. 2.3).

В примесном полупроводнике зависимость $\sigma(T)$ более сложная. При низких температурах концентрация носителей заряда определяется интенсивностью процесса ионизации примесей, а $\mu \sim T^{3/2}$, при высоких температурах происходит процесс генерации пар, а $\mu \sim T^{-3/2}$. В этом случае электропроводность примесного полупроводника можно выразить как сумму проводимости основной решетки $\sigma_{\text{осн}}$ и проводимости, обусловленной примесью $\sigma_{\text{пр}}$, т. е.

$$\sigma = \sigma_{\text{осн}} + \sigma_{\text{пр}} = \sigma_0 \exp(-\Delta E_0 / 2kT) + \sigma_1 \exp(-\Delta E / 2kT),$$

где ΔE — энергия активации примесных носителей заряда.

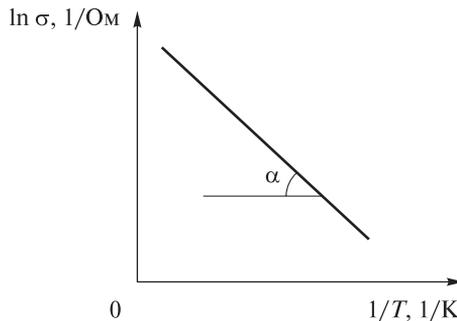


Рис. 2.3. Температурная зависимость электропроводности собственного полупроводника ($\text{tg} \alpha = \Delta E_0 / 2k$)

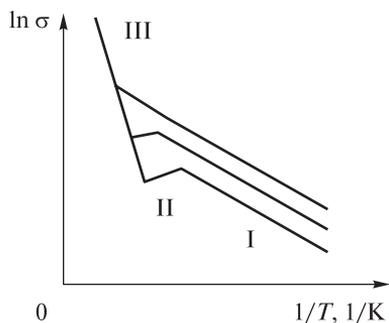


Рис. 2.4. Температурная зависимость электропроводности примесного полупроводника

Зависимость $\ln \sigma - 1/T$ для примесного полупроводника представлена на рис. 2.4.

При низких температурах участок I на кривой соответствует примесной электропроводности. После того как примеси исчерпаны (участок II), электропроводность может несколько уменьшаться за счет падения μ . Участок III соответствует собственной электропроводности.

Если концентрация примеси достаточно велика, участок II отсутствует. Процесс генерации пар начинается, когда примеси еще не исчерпаны.

Ниже приведены значения ширины запрещенной зоны ΔE для некоторых полупроводников.

| | | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Материал | Ge | Si | GaAs | CdS | CdSe | PbS | InSb |
| ΔE , эВ..... | 0,72 | 1,12 | 1,42 | 2,42 | 1,70 | 0,41 | 0,17 |

Экспериментальная часть

Лабораторная работа проводится в следующей последовательности.

Подготовить оборудование к выполнению лабораторной работы. Схема лабораторного макета показана на рис. 2.5. Макет состоит из электрического нагревателя 3 в виде полого цилиндра, внутри которого размещены терморезистор 2 и термодатчик 4. Термодатчик подключен к цифровому дисплею 5, показывающему температуру внутри цилиндрического нагревателя. Терморезистор изготовлен из собственного полупроводника, и его выводы подключены к омметру 1.

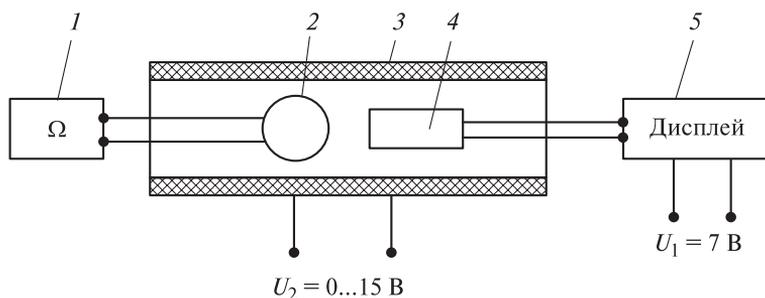


Рис. 2.5. Схема лабораторного макета для измерения ширины запрещенной зоны полупроводников:

1 — омметр; 2 — терморезистор; 3 — электрический нагреватель; 4 — термодатчик; 5 — дисплей термодатчика (цифровой термометр)

Все элементы макета, кроме омметра, смонтированы в пластмассовом корпусе, снабженном разъемами для подключения нагревателя и дисплея к источникам питания. Для подключения омметра на корпусе установлены отдельные разъемы.

Перед выполнением лабораторной работы необходимо собрать лабораторный стенд в следующей последовательности:

1) для обеспечения питания дисплея подключить проводами разъемы макета с обозначением «Дисплей $U = 7 \text{ В}$ » к первому каналу источника питания, соблюдая полярность;

2) для обеспечения питания электрического нагревателя подключить проводами разъемы макета с обозначением «Нагреватель» ко второму каналу источника питания;

3) подключить проводами омметр к соответствующим разъемам макета. Полярность подключения значения не имеет. В качестве измерительного прибора можно использовать также мультиметр (тестер) или иной универсальный измерительный прибор со встроенным омметром;

4) установить диапазон измерений омметра (измерительного прибора), килоом. Если в процессе измерения сопротивления образца выяснится, что удобнее работать в другом диапазоне, переключить прибор в другой диапазон измерений.

Порядок выполнения экспериментальной части лабораторной работы.

1. Проверить правильность собранной схемы измерений (см. рис. 2.5).

2. Включение питания разрешается только после проверки преподавателем правильности собранной схемы.

3. Включить измерительный прибор и установить режим измерения сопротивления.

4. Установить на источнике питания все ручки регулировки напряжения в положение «0» (в крайнее правое положение против хода часовой стрелки).

5. Включить источник питания.

6. Установить на источнике питания на канале, подключенном к дисплею, напряжение 7 В . Во избежание выхода из строя дисплея категорически запрещается устанавливать напряжение более 7 В .

7. Снять первое значение сопротивления на омметре и значение температуры на дисплее и записать в таблицу журнала.

8. Установить на источнике питания на канале, подключенном к электрическому нагревателю, напряжение 4 В и следить за изменением сопротивления и температуры в течение примерно 10 мин . За это время температура нагревателя повысится и стабилизируется. О стабилизации свидетельствует прекращение изменения одновременно и сопротивления и температуры. Снять показания омметра и дисплея и записать их в таблицу.

9. Повторить п. 8 для напряжений 8 В и 12 В . Во избежание выхода из строя макета категорически запрещается устанавливать напряжение более 12 В .

Завершение работы

После проведения измерений выключить оборудование, соблюдая приведенный ниже порядок:

- 1) выключить источник питания;
- 2) выключить измерительный прибор;
- 3) разобрать схему измерений;
- 4) сдать лабораторный макет преподавателю.

Содержание отчета

Отчет должен быть оформлен в виде журнала лабораторных работ (прил. 1).
Содержание отчета:

- 1) краткая теоретическая часть в виде ответов на контрольные вопросы;
- 2) схема стенда для измерения электропроводности полупроводников;
- 3) таблица с экспериментальными данными и расчеты;
- 4) график зависимости $\ln\sigma$ от $1/T$ и рассчитанное значение ширины запрещенной зоны;
- 5) выводы.

Контрольные вопросы и задания

1. Каким образом с точки зрения зонной модели возникают свободные носители заряда в разрешенных зонах?
2. Как объяснить температурную зависимость подвижности в полупроводниках?
3. Чем объясняется различный вид температурной зависимости сопротивления у металлов и полупроводников?
4. Какова природа температурной зависимости ширины запрещенной зоны полупроводников?
5. Дайте классификацию твердых тел по электрическим свойствам на основе зонной теории.
6. Что называется подвижностью носителей заряда и как она зависит от температуры?
7. По каким характерным признакам твердые тела подразделяют на металлы, полупроводники и диэлектрики?
8. Что называется зоной проводимости?
9. Что называется запрещенной зоной?
10. Что называется валентной зоной?
11. Что такое «дырки»?
12. Что понимают под собственной электропроводностью?
13. Что понимают под примесной электропроводностью?
14. Можно ли температурную зависимость электропроводности представить графически в виде прямой линии? Если да, то в каких координатах?
15. Что определяет угловой коэффициент α ?