

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ
РАДИОТЕХНИКИ, ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Методические указания
по выполнению лабораторных работ

Москва 2008

Составители: В.Ф. Мещеряков, И.В. Гладышев

Редактор: А.И. Морозов

Методические указания содержат описания и краткий теоретический материал к лабораторным работам по изучению электрофизических параметров полупроводников, предлагаемых студентам МИРЭА специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» по курсу «Физика твердого тела» и специальности 210601 «Нанотехнологии в электронике» по курсу «Физика конденсированного состояния».

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)».

Рецензенты: А.А. Буш
Л.М. Лазаренко

© Московский государственный
институт радиотехники,
электроники и автоматики
(технический университет),
2008

Работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА

Содержание:

ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ	4
НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ в системе СИ	4
1. НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ.....	5
1.1. Образование зон в твердых телах и закон дисперсии для электрона в зоне.....	5
1.2. Металлы, диэлектрики, полупроводники	7
2. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ.....	10
2.1. Температурная зависимость сопротивления.....	10
2.2. Фотопроводимость	12
3. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ	13
3.1. Определение ширины запрещенной зоны собственного полупроводника по температурной зависимости сопротивления.....	13
3.1.1. Цель работы:	13
3.1.2. Задание:	13
3.1.3. вопросы:	14
3.1.4. Описание установки для измерения сопротивления собственного полупроводника	14
3.1.5. Порядок выполнения работы	17
3.1.6. Обработка результатов измерений	17
3.2. Определение ширины запрещенной зоны и энергии примесного уровня полупроводника по частотной зависимости фотопроводимости.....	18
3.2.1. Цель работы:	18
3.2.2. Задание:	18
3.2.3. Описание лабораторной установки для измерения фотопроводимости	19
3.2.4. Порядок выполнения работы	20
3.2.5. Обработка результатов измерений	20

3.3. Перечень вопросов необходимых для получения зачета по лабораторной работе.	21
ЛИТЕРАТУРА:	22

ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ

$$1 \text{ эВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ эВ} \longrightarrow \begin{cases} 11604,5 \text{ К} \\ 8065,5 \text{ см}^{-1} \\ 2,42 \cdot 10^{14} \text{ Гц} \end{cases}$$

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ в системе СИ

Постоянная Планка	\hbar	$1,06 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{К}$
Заряд электрона	e	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Скорость света	c	$3 \cdot 10^8 \text{ м} / \text{с}$
Масса электрона	m_e	$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$

1. НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

1.1. Образование зон в твердых телах и закон дисперсии для электрона в зоне

Введем простейшие представления о металле, диэлектрике и полупроводнике. Как известно из квантовой механики, состояние электрона в атоме можно описать набором квантовых чисел n, l, m_l, s, m_s , где $n=1,2,\dots$ - главное квантовое число, $l=0, 1, \dots, n-1$ - орбитальное квантовое число, $m_l=0, \pm 1, \dots, \pm l$ - магнитное квантовое число, $s=1/2$ - спиновое квантовое число, а $m_s=\pm 1/2$ описывает значение проекции спина электрона на выделенную ось. Состояния с заданным n и l принято обозначать цифрой, соответствующей значению n , и последующей буквой, соответствующей значению l . Буквы s, p, d, f означают $l=0, 1, 2, 3$.

Согласно принципу Паули в квантовом состоянии, которое характеризуется полным набором квантовых чисел, может находиться не более одной ферми-частицы, в нашем случае - электрона.

Если вещество состоит из N одинаковых атомов, то имеется N одинаковых уровней или, как говорят, каждый уровень с заданными n, l, m_l, s, m_s N -кратно вырожден. При образовании кристаллической структуры уровни расщепляются, и вместо одного уровня энергии возникает зона разрешенных значений энергии с $2N$ уровнями. Двойка возникает вследствие того, что в немагнитных веществах вырождение по значению m_s остается и после образования кристалла. Зоны принято обозначать так же, как и уровни энергий, из которых они образованы (см. рис. 1.1). Число зон с заданным n и l равно $2l+1$, например, возникает три $3p$ -зоны, пять $3d$ -зон и т.д.

Каждому из разрешенных значений энергии внутри зоны соответствует блоховская волновая функция, определяемая величиной квазиимпульса электрона. Зависимость энергии от

величины квазиимпульса называется законом дисперсии данной зоны разрешенных значений энергии.

Зоны разрешенных значений энергии разделены интервалами, где уровни энергии отсутствуют. Эти интервалы носят названия запрещенных зон.

Поскольку уровни энергий внутренних оболочек атомов полностью заполнены, то образованные из этих уровней зоны также будут заполнены. Электрический ток представляет собой направленное движение электронов и для его возникновения необходимо, чтобы электроны имели возможность изменить свой квазиимпульс и, таким образом, перейти на другой уровень.

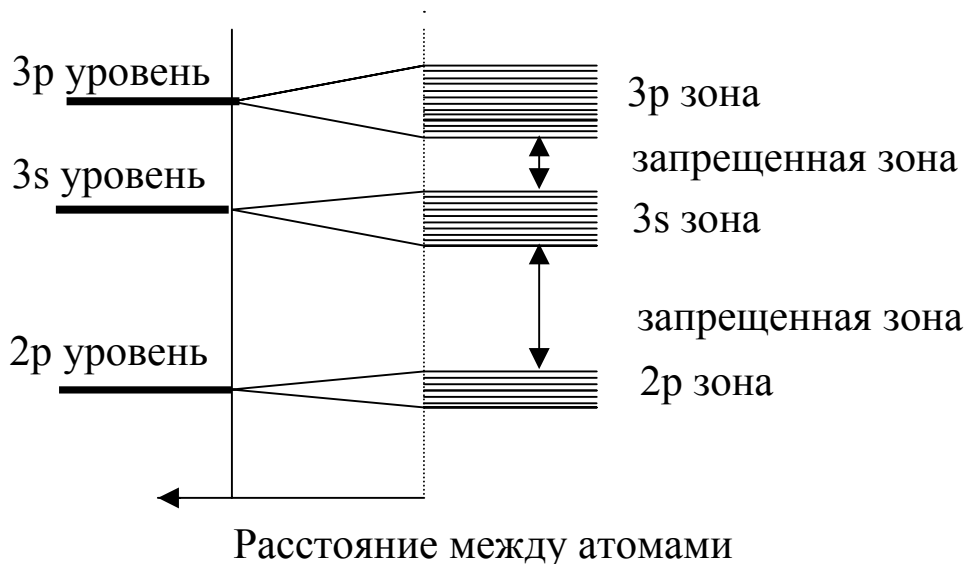


Рис. 1.1. Схема энергетических зон в кристаллах.

Поэтому полностью заполненная зона не вносит вклад в перенос электрического заряда. Если же на незаполненной оболочке атома находится нечетное число электронов, то одна из соответствующих им зон будет заполнена наполовину (или несколько зон будет заполнено частично).

На свободные уровни электроны также могут переходить под действием электромагнитного излучения с энергией кванта (фотона) $E = \hbar\omega$. Кроме того, эти переходы могут осуществляться за счет энергии теплового движения. Как известно, средняя энергия теплового движения $\varepsilon \sim kT$. Здесь $\hbar = 1.06 \cdot 10^{-34}$ Дж·с –

постоянная Планка, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура.

Валентной зоной называется последняя, полностью заполненная при температуре абсолютного нуля зона.

Пустая, либо частично заполненная при $T=0$ зона, следующая за валентной, называется зоной проводимости.

В зависимости от того, насколько заполнена зона проводимости при $T=0$, вещества разделяют на металлы и диэлектрики. Диэлектрики, в свою очередь, в зависимости от ширины запрещенной зоны, разделяющей валентную зону и зону проводимости, подразделяются на собственно диэлектрики и полупроводники.

1.2. Металлы, диэлектрики, полупроводники

Металлами называют вещества, у которых при температуре абсолютного нуля зона проводимости является частично заполненной. В этом случае, под воздействием внешнего электрического поля, легко возникает электрический ток, так как электроны имеют возможность переходить в возбужденные состояния на свободные уровни и менять свой импульс, причем незаполненные состояния не отделены от заполненных запрещенной зоной.

Рассмотрим теперь случай, когда при абсолютном нуле температуры зона проводимости оказывается пустой. Поскольку валентная зона полностью заполнена (свободные уровни энергии отсутствуют), то находящиеся там электроны не могут участвовать в переносе электрического заряда, и сопротивление образца будет равно бесконечности. Обозначим ширину запрещенной зоны, отделяющей валентную зону от зоны проводимости как E_g . При конечных температурах из-за теплового движения, часть электронов переходит в зону проводимости. Если ширина запрещенной зоны E_g больше ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$), то при комнатных температурах количество электронов в зоне проводимости будет ничтожно малым и проводимость практически равна нулю. Вещества, у которых при $T=0$ зона проводимости пуста, а запрещенная зона больше 3 эВ

называют диэлектриками.

Полупроводниками называются вещества, у которых при $T=0$ зона проводимости пустая, а запрещенная зона меньше 3 эВ . Для них при комнатных температурах в зоне проводимости, из-за теплового движения, находится достаточное количество электронов, обеспечивающих заметную проводимость. Электроны, переходя в зону проводимости, оставляют в валентной зоне свободные уровни. На эти уровни могут переходить электроны внутри валентной зоны, освобождая при этом другие уровни. Этот процесс можно рассматривать как появление в валентной зоне свободных носителей тока положительного знака, которые называют дырками. Создаваемый ими ток называют дырочным.

В статистической физике показывается, что среднее число электронов $\bar{n}(\varepsilon)$ на уровне с энергией ε в полупроводнике описывается распределением Ферми-Дирака (1)

$$\bar{n}(\varepsilon) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu}{kT}\right) + 1} \quad (1)$$

где μ - химический потенциал. По определению, химический потенциал это энергия, которую нужно затратить, чтобы перенести один электрон из бесконечности в данный полупроводник. В физике полупроводников уровень энергии, соответствующий химическому потенциалу принято называть уровнем Ферми.

Его положение в собственных (беспримесных) полупроводниках при $T=0$ соответствует середине запрещенной зоны. Обычно за нулевой уровень энергии принимается энергия, соответствующая потолку валентной зоны, тогда $\mu = E_g/2$.

Проводимость, обусловленная переходами электронов из валентной зоны в зону проводимости, называется собственной. Полупроводники, где основной вклад в проводимость вносит собственная проводимость, называют собственными

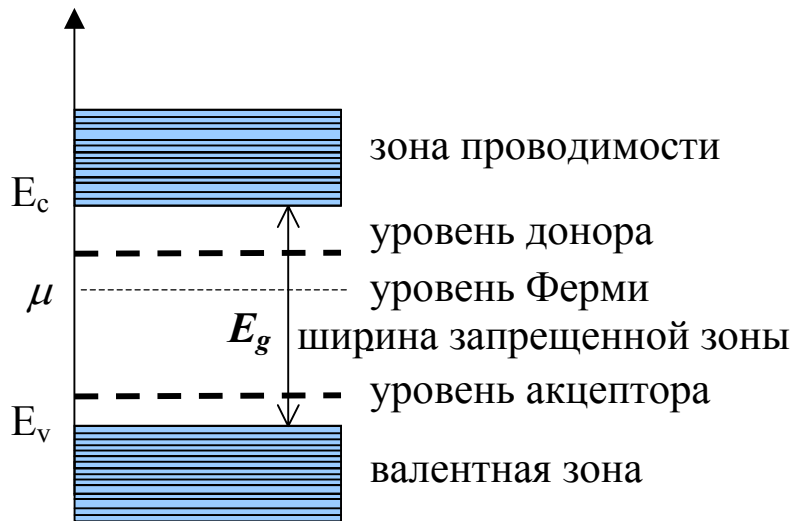


Рис. 1.2. Схема энергетических зон полупроводника с примесной проводимостью.

полупроводниками.

Кроме собственной проводимости в полупроводниках может существовать примесная проводимость, возникающая из-за присутствия в кристалле посторонних атомов. Если валентность примесных атомов больше валентности атомов основной матрицы¹, то их называют донорами. Примесные атомы с недостатком валентных электронов называют акцепторами.

Наличие примесных атомов приводит к тому, что в запрещенной зоне появляются дополнительные примесные уровни энергии. Донорные уровни располагаются вблизи дна зоны проводимости (рис. 1.2), и уже при комнатных температурах электроны с этих уровней переходят в зону проводимости. Акцепторные уровни располагаются вблизи верхнего края валентной зоны (рис. 1.2). При комнатных температурах эти уровни заполняются электронами из валентной зоны, а в самой зоне появляются дополнительные свободные уровни - дырки.

¹ Матрицей называют собственный полупроводник, в который вводится примесь.

2. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

2.1. Температурная зависимость сопротивления

В отличие от металлов, где сопротивление с увеличением температуры растет, в полупроводниках оно падает.

Как известно, в присутствии электрического поля возникает направленное движение электрических зарядов, а плотность тока j в образце равна:

$$\vec{j} = Nq\langle\vec{v}\rangle \quad (2)$$

где N - среднее число носителей заряда в единице объема (концентрация носителей), q - заряд одного носителя, а $\langle\vec{v}\rangle$ - средняя скорость его направленного движения, которая связана с напряженностью приложенного электрического поля E как

$$|\langle\vec{v}\rangle| = \gamma E, \quad (3)$$

γ - подвижность носителя заряда. Из закона Ома в дифференциальной форме $\vec{E} = \rho\vec{j}$ находим для удельного сопротивления выражение

$$\rho = (N|q|\gamma)^{-1}. \quad (4)$$

В металлах среднее число электронов в зоне проводимости с ростом температуры не меняется и зависимость сопротивления от температуры определяется рассеянием электронов на атомах решетки, которое приводит к уменьшению подвижности γ с ростом температуры и, соответственно, увеличению сопротивления. В полупроводниках же среднее число электронов в зоне проводимости с увеличением температуры растет по экспоненциальному закону, на фоне которого изменением γ с температурой по степенному закону часто можно пренебречь.

Поэтому сопротивление полупроводника определяется, в основном, числом носителей заряда, что приводит к уменьшению его сопротивления с увеличением температуры.

Таким образом, для определения температурной зависимости сопротивления полупроводника достаточно вычислить соответствующую зависимость для числа носителей.

В собственном полупроводнике при комнатных температурах в зоне проводимости занятыми оказываются лишь уровни, находящиеся вблизи дна зоны проводимости. В этом случае в качестве энергии электрона ε в формуле (1) можно взять энергию E_g – соответствующую дну зоны проводимости. При этом, полагая $\varepsilon - \mu \approx E_g - \mu \approx E_g / 2$, для $E_g - \mu \gg kT$ для концентрации электронов в зоне проводимости можно получить:

$$N_e = N_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right). \quad (5)$$

В собственном полупроводнике концентрация дырок N_h равна концентрации электронов в зоне проводимости $N_h = N_e$, а постоянная N_0 зависит от температуры степенным образом.

Подвижности электронов γ_e и дырок γ_h , как правило, различны и поэтому ток I , текущий через образец сечением S будет определяться выражением:

$$I = e(\gamma_e + \gamma_h)SN_eE \quad (6)$$

где e – элементарный заряд. Если L – длина образца, то разность потенциалов $U = EL$ и, подставив в (6) концентрацию (5), для сопротивления образца $R = U/I$ окончательно имеем:

$$R = R_0 \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (7)$$

где предэкспоненциальный множитель

$$R_0 = \frac{L}{e(\gamma_e + \gamma_h)SN_e}. \quad (8)$$

определяется подвижностью электронов и дырок, геометрией образца и зависит от температуры степенным образом.

2.2. Фотопроводимость

Характерной особенностью полупроводников является то, что их электропроводность увеличивается под действием света. Это явление получило название внутреннего фотоэффекта или фотопроводимости. Внешнее электромагнитное излучение поглощается в полупроводнике, вызывая электронные переходы, приводящие к появлению свободных носителей заряда (электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне).

Фотопроводимость могут создавать электронные переходы трех типов. В переходах первого типа электроны из валентной зоны переходят в зону проводимости, а в валентной зоне появляются дырки (см. рис. 1.2). Для этого энергия фотона должна быть больше, либо равняться ширине запрещенной зоны ($\hbar\omega \geq E_g$). Возникающая при таких переходах фотопроводимость называется собственной фотопроводимостью. Граничная частота, при которой возникает фотопроводимость, называется красной границей фотоэффекта. В данном случае она равна $\omega_{zp} = E_g / \hbar$. Соответствующая этой частоте длина волны λ_{zp} равна

$$\lambda_{zp} = \frac{2\pi c}{\omega_{zp}} = \frac{2\pi\hbar c}{E_g}, \quad (9)$$

где c – скорость света в вакууме, $c=3 \cdot 10^8$ м/с.

В примесных полупроводниках дополнительно возникают переходы двух типов. В случае доноров возможен переход с примесного уровня в зону проводимости (переход второго типа).

Донор оказывается ионизированным, а в зоне проводимости появляется дополнительный электрон. В случае акцепторов электроны из валентной зоны переходят на примесный уровень (переход третьего типа). Акцептор оказывается ионизированным, а в валентной зоне возникает дырка. В обоих случаях красная граница фотоэффекта сдвигается в сторону больших длин волн по сравнению с собственным полупроводником. Соответствующая граничная длина волны $\tilde{\lambda}_{cp}$ равна

$$\tilde{\lambda} = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{2\pi\hbar c}{E}, \quad (10)$$

где E_i – энергия ионизации донора или акцептора.

Фотопроводимость, возникшую за счет переходов второго и третьего типов, называют примесной фотопроводимостью.

3. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

3.1. Определение ширины запрещенной зоны собственного полупроводника по температурной зависимости сопротивления

3.1.1. Цель работы:

измерение ширины запрещенной зоны полупроводника по температурной зависимости сопротивления.

3.1.2. Задание:

измерить зависимость сопротивления собственного полупроводника от температуры; по полученным данным определить ширину запрещенной зоны полупроводника.

Подготовка к выполнению работы состоит в ознакомлении с материалом, позволяющим ответить на перечисленные ниже

3.1.3. вопросы:

1. В чем состоит цель работы?
2. Показания каких приборов необходимо записывать в процессе проведения измерений?
3. Какие сопротивления называют активными, а какие реактивными?
4. Напишите выражение для реактивного сопротивления.
5. Что такое мост постоянного тока и баланс моста?
6. Напишите условие балансировки моста постоянного тока.
7. Какие причины препятствуют балансировке моста?
8. Почему, если не менять в течение всего процесса измерений в плечах моста сопротивления R_1 и R_2 , то их величины не скажутся на определении ширины запрещенной зоны, определенной по наклону прямой на графике $\ln R$ от $1/T$?
9. Что такое термо-ЭДС?
10. Что такое магазин сопротивлений?
11. Что описывают уравнения Кирхгофа?
12. Почему при измерении сопротивления с помощью моста постоянного тока используется переменное напряжение?
13. Какие два противоречивых требования предъявляются к рабочей частоте при измерениях сопротивления полупроводника с помощью моста постоянного тока?
14. Что такое звуковой генератор?
15. Для чего нужен осциллограф?

3.1.4. Описание установки для измерения сопротивления собственного полупроводника

Общий вид установки для измерения температурной зависимости сопротивления полупроводника показан на рис. 3.1. Для измерения сопротивления полупроводника в данной работе используется схема, которую называют мостом постоянного тока. Достоинством этой схемы является возможность, на основе компенсационного метода, измерять сопротивление образцов с точностью, определяемой тепловыми шумами измерительного

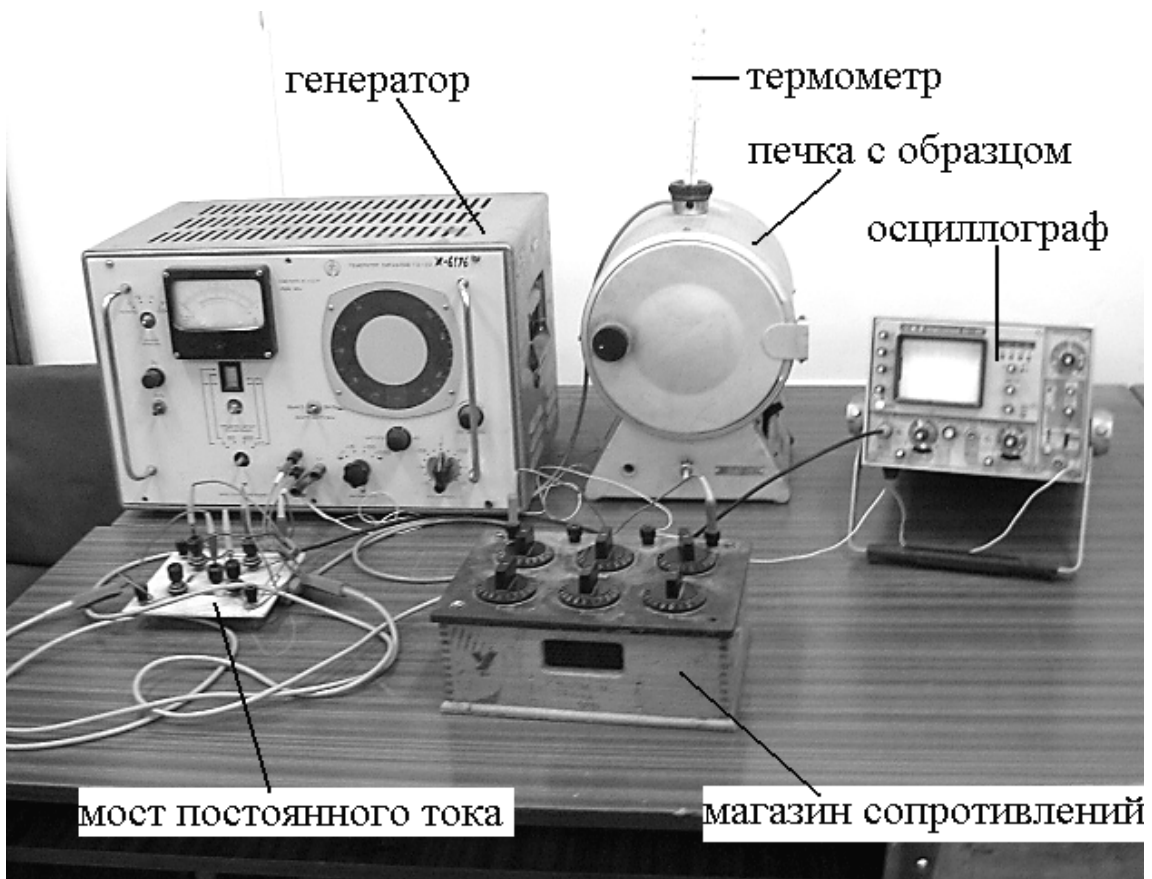


Рис. 3.1. Общий вид установки для измерения температурной зависимости сопротивления полупроводника.

прибора. Схема моста приведена на рис. 3.2. Четыре активных сопротивления включены последовательно, образуя кольцо, так называемый мост. Одно из них $R_{ПП}$ представляет собой измеряемый образец полупроводника, а другое R_M - магазин сопротивлений, позволяющий менять сопротивление в широких пределах с точностью до 0,1 Ом. Если, как показано на рисунке, на одну из диагоналей моста подать напряжение, то, меняя сопротивления в плечах моста, можно добиться того, что напряжение в другой диагонали обратится в ноль. Условие, когда при наличии напряжения в одной из диагоналей моста в другой диагонали напряжение отсутствует, называют условием балансировки моста. Используя уравнения Кирхгофа для цепей постоянного тока, можно показать, что обращение напряжения в

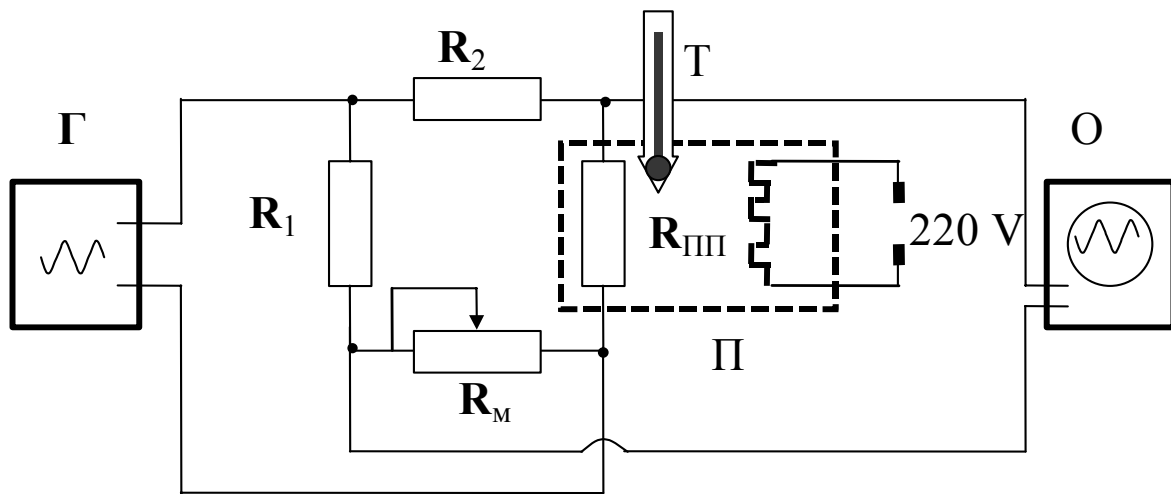


Рис. 3.2. Схема моста постоянного тока для измерения сопротивления.

Г- генератор сигналов, О – осциллограф, П - нагревательная печь, Т- термометр, R_1 и R_2 – постоянные сопротивления, R_M – магазин сопротивлений, R_{III} – полупроводник.

ноль соответствует условию равенства произведений сопротивлений в противоположных плечах моста:

$$R_1 \cdot R_{III} = R_2 \cdot R_M. \quad (11)$$

Если в качестве элементов схемы используются реактивные сопротивления (конденсаторы и емкости), то мост называют мостом переменного тока. Условие балансировки моста имеет тот же вид, что и (11), только активные сопротивления заменяются реактивными.

Наличие так называемых паразитных реактивных сопротивлений (индуктивностей и емкостей, создаваемых подводными проводами), не позволяет добиться полной компенсации. Для уменьшения нескомпенсированного напряжения необходимо выбирать рабочую частоту как можно меньше. С другой стороны, при работе на более высоких частотах, увеличивается чувствительность регистрирующих приборов. Исходя из этих двух противоречивых требований, выбирают оптимальную рабочую частоту (~ 600 Гц).

В установке в качестве источника сигнала используется звуковой генератор², а определение момента компенсации напряжения в другой диагонали моста проводится с помощью осциллографа. Образец помещен внутри нагревательной печи П, а температура внутри ее измеряется с помощью обычного градусника.

3.1.5. Порядок выполнения работы

1. Включить звуковой генератор и установить на его выходе сигнал с амплитудой 1 В. Частота генератора должна быть установлена в диапазоне 500 ÷ 800 Гц.
 2. Сбалансировать мост. Балансировка производится с помощью магазина сопротивлений R_М. В положении баланса амплитуда сигнала на экране осциллографа минимальна. Записать величину сопротивления R_М. При балансе сопротивление полупроводника R_{ПП} = R₂R_М / R₁. Следует отметить, что на наклоне прямой, определяющей ширину запрещенной зоны, величина сопротивлений R₁ и R₂ не сказывается.
 3. Записать показание термометра.
 4. Включить нагрев печи.
 5. По мере повышения температуры через каждые 5 градусов вплоть до T=100÷120° С проводить измерения согласно п.п.2,3.
- Внимание!** Не перегревать печь выше 130° С!

3.1.6. Обработка результатов измерений

1. Построить график зависимости $\ln R$ от $1/T$ и по наклону графика, используя формулу (7), определить ширину запрещенной зоны исследуемого полупроводника.
2. Рассчитать приборную погрешность определения ширины запрещенной зоны, используя выражение:

$$\Delta E_g(R, T) = \frac{\partial E}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial E}{\partial T} \Delta T, \quad (12)$$

² Звуковой генератор является источником переменного тока частотой от 20 Гц до 20 кГц.

где ΔR , ΔT – погрешности определения сопротивления и температуры.

3. Записать вывод по работе.

3.2. Определение ширины запрещенной зоны и энергии примесного уровня полупроводника по частотной зависимости фотопроводимости

3.2.1. Цель работы:

определение ширины запрещенной зоны и энергии примесного уровня полупроводника с помощью спектральных измерений.

3.2.2. Задание:

измерить зависимость сопротивления примесного полупроводника от частоты падающего света; по полученным данным рассчитать ширину запрещенной зоны полупроводника и энергию примесного уровня.

Подготовка к выполнению работы состоит в ознакомлении с материалом, позволяющим ответить на вопросы:

1. В чем состоит цель работы?
2. Показания каких приборов необходимо записывать в процессе проведения измерений?
3. Нарисуйте принципиальную схему установки и объясните назначения каждого прибора.
4. В чем состоит назначение монохроматора?
5. Для чего нужны щели в монохроматоре?
6. Зачем в монохроматоре нужна призма?
7. Почему величина нагрузочного сопротивления в измерительной схеме должна быть значительно меньше сопротивления образца?

3.2.3. Описание лабораторной установки для измерения фотопроводимости

Принципиальная схема установки для исследования фототока от длины волны падающего света приведена на рис. 3.3.

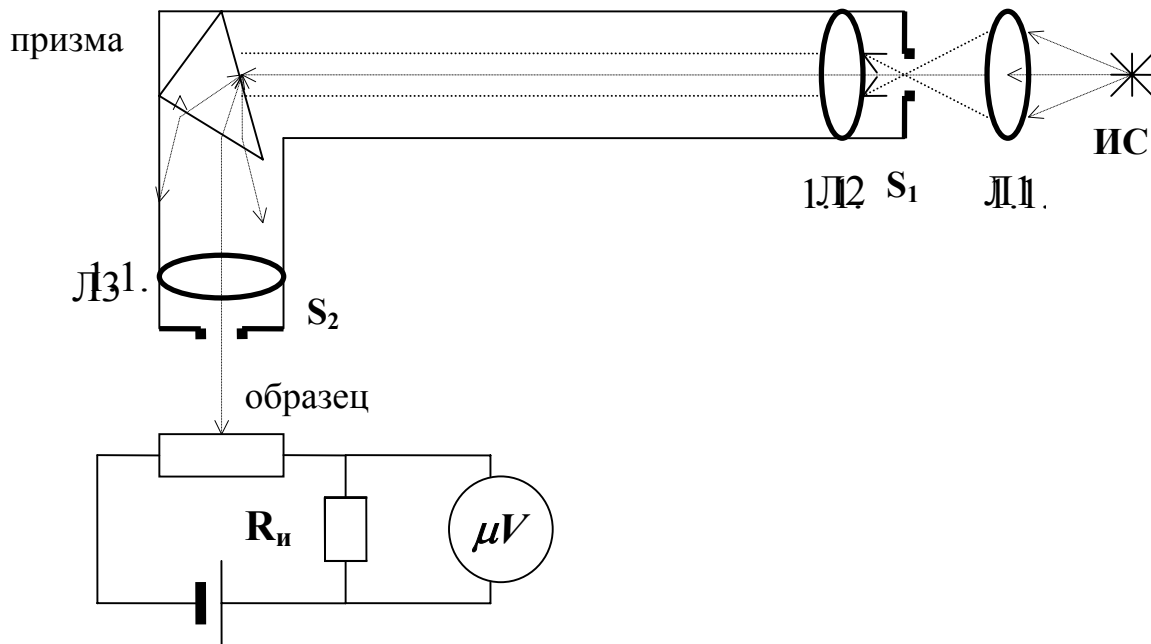


Рис. 3.3. Блок-схема установки для исследования частотной зависимости фототока.

ИС - источник света, **S₁**, **S₂** - щели монохроматора, **R_н**- нагрузочное сопротивление, **Л1-Л3** – линзы, **μV** - микровольтметр.

Свет от источника **ИС** с помощью линзы **Л1** сфокусирован на входную щель **S₁** монохроматора. Эта щель находится в фокусе линзы **Л2**. Параллельный пучок лучей, выходящий из линзы, падает на призму. Призма разлагает свет в спектр. Каждой длине волны соответствует определенный угол, под которым свет выходит из призмы. Выходная щель монохроматора **S₂** находится в фокальной плоскости линзы **Л3** и вырезает из спектра нужную область. Прошедший сквозь выходную щель свет падает на исследуемый образец. Последовательно с образцом включен источник питания и нагрузочное сопротивление **R_н**. Падающее на нем напряжение пропорционально току, текущему через образец. Для того, чтобы ток в этой цепи определялся сопротивлением образца, необходимо, чтобы величина $R_{\text{ОБР}} \gg R_{\text{н}}$. При этом

падение напряжения на нагрузочном сопротивлении много меньше, чем на образце, и его величина может быть измерена с помощью микровольтметра μV .

3.2.4. Порядок выполнения работы

1. Включить лампу накаливания.
2. Включить источник напряжения, питающего измерительную цепь.
3. Снять зависимость фототока от длины волны падающего света. Для этого необходимо:
 - а) вращая барабан монохроматора, установить метку его отсчета в нужном положении и подождать $10 \div 20$ секунд, для того чтобы фототок установился вблизи равновесного значения;
 - б) записать показания шкалы барабана;
 - в) используя градуировочный график записать длину волны света
 - г) записать показания микровольтметра.
4. Указанную в п. 3 последовательность измерений провести во всем диапазоне длин волн монохроматора.

3.2.5. Обработка результатов измерений

1. Построить график зависимости фототока от длины волны падающего света.
2. Из полученного графика, по началу первого подъема фототока справа, используя формулу (10), определить энергию ионизации примесного уровня. По началу второго подъема фототока справа, используя формулу (9), определить ширину запрещенной зоны исследуемого полупроводника.
3. Рассчитать приборную погрешность определения ширины запрещенной зоны и энергию примесного уровня, используя формулу аналогичную формуле (12).
4. Записать вывод по работе.

3.3. Перечень вопросов необходимых для получения зачета по лабораторной работе.

1. Как зависит сопротивление металлов от температуры и почему?
2. Как зависит сопротивление полупроводников от температуры и почему?
3. Какие квантовые числа описывают состояние электрона в атоме?
4. Какие квантовые числа характеризуют зону?
5. Какая величина характеризует состояние электрона в зоне?
6. Написать волновую функцию свободного электрона, где в качестве переменной используется импульс частицы.
7. Что такое блоховская функция?
8. Что такое квазиимпульс электрона?
9. Какая зона называется запрещенной?
10. Какая зона называется валентной?
11. Какая зона называется зоной проводимости?
12. Что такое фотон и чему равна его энергия?
13. Какие вещества обладают металлической проводимостью с точки зрения зонной теории?
14. Чем отличаются диэлектрики от полупроводников с точки зрения зонной теории?
15. Какие возбуждения в полупроводнике называют дырками?
16. Как зависит для полупроводников число электронов в зоне проводимости от температуры и почему?
17. Какие полупроводники называют собственными?
18. Что такое доноры с точки зрения зонной теории?
19. Что такое акцепторы с точки зрения зонной теории?
20. Что такое уровень Ферми и чему он равен в собственных полупроводниках при нуле температуры?
21. Найдите величину энергии в джоулях, соответствующую 1 электрон-вольту.
22. Найдите величину энергии в джоулях, соответствующую 1 К.
23. Найдите величину энергии фотона в джоулях, соответствующую 1 см^{-1} .
24. Напишите выражение для распределения Ферми-Дирака.

25. Напишите выражение для распределения Больцмана.
30. Чем отличается собственная проводимость от примесной?
31. Какие примесные уровни в полупроводниках называют донорными, а какие акцепторными?
32. Что называют фотопроводимостью?
33. Что такое красная граница фотоэффекта?
34. Почему красную границу фотоэффекта определяют по началу подъема фототока I с правой стороны графика $I(\lambda)$, где λ - длина волны света?
35. Нарисуйте зонную структуру примесного полупроводника и оптические переходы, приводящие к появлению в валентной зоне дырок, а в зоне проводимости – электронов.
36. Почему красная граница примесной фотопроводимости лежит правее красной границы собственной фотопроводимости на графике зависимости фототока от длины волны света?

ЛИТЕРАТУРА:

1. Морозов А.И. Физика твердого тела: Электроны в кристалле. Металлы. Полупроводники. Диэлектрики. Магнетики. Сверхпроводники — М.: МИРЭА, 2008.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1998. Т.5 (§§ 8.1 - 8.2, 8.6, 9.5 - 9.6)
3. А.А. Берзин, В.Г. Морозов. Основы квантовой механики, Москва, МИРЭА, 2005 г.
4. *Механика и молекулярная физика: Лабораторный практикум по физике. — М.: МИРЭА, 1997. (Введение, Дополнение).
5. *Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
6. *Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974.