

Лабораторная работа № 3

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ.

Цель работы: экспериментальное исследование зависимости проводимости полупроводников от температуры, экспериментальное определение ширины запрещенной зоны.

Материалы и приборы: исследуемый полупроводниковый элемент, измерительное устройство, блок нагрева, измеритель температуры.

Краткая теория явления.

Зависимость электропроводности от температуры. Известно, что значение удельной проводимости полупроводников определяется концентрацией свободных носителей заряда и их подвижностью:

$$\gamma = \gamma_n + \gamma_p = en\mu_n + ep\mu_p \quad (1)$$

Подвижность носителей заряда μ определяется прежде всего их эффективной массой, скоростью и частотой столкновений с узлами и дефектами кристаллической решетки и в целом слабо зависит от температуры. Поэтому **на характер зависимости электропроводности полупроводников от температуры основное влияние оказывает концентрация носителей заряда.**

Рассмотрим это влияние на примере полупроводника, легированного донорной примесью, основными носителями заряда которого являются электроны. Будем считать, что $\mu_n = \text{const}$.

При температуре, стремящейся к абсолютному нулю, все электроны связаны с атомами, в зоне проводимости электронов нет, и проводимость равна нулю. Если за счет внешней энергии повысить температуру полупроводника, то некоторые электроны начнут переходить в зону проводимости. Прежде всего, это коснется слабо связанных электронов атомов примесей, которым для перехода в зону проводимости необходима энергия W_d , много меньшая, чем энергия активации собственных электронов. Следовательно, с ростом температуры концентрация носителей заряда и проводимость будут возрастать. Упрощенно эту зависимость можно описать выражением:

$$\gamma = \gamma_{\text{прим}} = \gamma_{0\text{прим}} \cdot e^{-\frac{W_d}{2kT}} \quad (2)$$

где $\gamma_{0\text{прим}}$ — постоянный коэффициент.

Для удобства изображения принято строить график зависимости не $\gamma=f(T)$, а $\ln\gamma=f(1/T)$.

Прологарифмировав выражение (2), получим:

$$\ln \gamma = \ln \gamma_{0\text{прим}} - \frac{W_d}{2k} \cdot \frac{1}{T} \quad (3)$$

т. е. $\ln\gamma$ линейно возрастает при уменьшении $1/T$. Этому выражению соответствует участок 1—2 на рис. 1. При дальнейшем возрастании температуры произойдет истощение примеси, т. е. все валентные электроны примеси перейдут в зону проводимости, после чего проводимость перестанет увеличиваться (участок 2—3). Проводимость будет оставаться постоянной до тех пор, пока температура не увеличится настолько, что энергия собственных электронов превысит ширину запрещенной зоны. Тогда концентрация носителей заряда начнет резко возрастать за счет собственных электронов, переходящих в зону проводимости (участок 3—4). В связи с тем, что концентрация собственных атомов на несколько порядков больше концентрации атомов примесей, значение **собственной** электропроводности будет существенно больше значения **примесной**, и вклад последней в суммарную

электропроводность будет ничтожен. Описать изменение проводимости на участке 3—4 можно выражением, аналогичным (1):

$$\gamma = \gamma_{\text{собств}} = \gamma_{0\text{собств}} \cdot e^{-\frac{\Delta W}{2kT}} \quad (4)$$

Коэффициент γ_0 можно считать постоянной величиной, численное значение которой для ряда полупроводников равно 10^5 . При высоких температурах полупроводники по величине проводимости приближаются к проводникам.

Согласно выражениям (1) и (3) на участке 1—2 определяется величиной $W_d/(2k)$, а на участке 3—4—величиной $\Delta W/(2k)$. Следовательно, исследовав зависимость $\ln\gamma=f(1/T)$ можно экспериментально определить ширину запрещенной зоны полупроводника и энергию ионизации примесей.

На рис. 1 приведено несколько кривых, соответствующих различной концентрации атомов примеси, причем $N_{д4} > N_{д3} > N_{д2} > N_{д1}$. Естественно, что при увеличении концентрации величина $\gamma_{\text{прим}}$ увеличивается. Одновременно за счет увеличения взаимодействия между примесными атомами уменьшается энергия ионизации примесей, а следовательно,

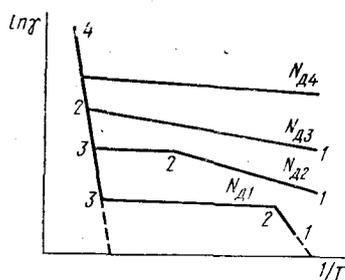


Рис. 1 Георетическая зависимость проводимости полупроводников от температуры при различных концентрациях примесей ($N_{д4} > N_{д3} > N_{д2} > N_{д1}$)

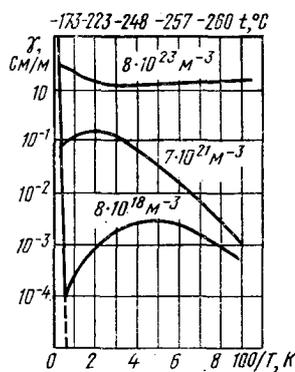


Рис 2 График зависимости удельной проводимости германия от температуры

уменьшается и наклон линий графика на участке 1—2. При достаточно большой концентрации примесей ($N_{д4}$) примесный уровень, расширяясь в зону, сливается с зоной проводимости, т. е. $W_d = 0$. Следовательно, уже при низких температурах все валентные электроны примеси являются проводимости, и концентрация примесных носителей заряда не

зависит от температуры. Такой полупроводник называют вырожденным примесным полупроводником. **На величину собственной проводимости (участок 3—4) концентрация примесей влияния не оказывает.**

Конечно, график рис.1 весьма идеализирован. На зависимость проводимости от температуры оказывает влияние непостоянство μ , наличие в полупроводнике нескольких видов примесных дефектов и другие причины. В качестве примера на рис. 2 приведен график реальной зависимости удельной проводимости германия n-типа с примесью мышьяка от температуры. Некоторое уменьшение проводимости при увеличении температуры до 100—300 К вызвано уменьшением подвижности носителей заряда за счет более частых столкновений с атомами кристаллической решетки.

Сделаем некоторые выводы.

С ростом температуры проводимость полупроводников увеличивается, т. е. они обладают отрицательным температурным коэффициентом сопротивления [см. формулы (1), (3)]. Эту зависимость используют для создания полупроводниковых первичных преобразователей температуры - термисторов. Для этой цели используют полупроводники, обладающие высоким значением γ в сочетании с высоким температурным коэффициентом сопротивления (в основном оксиды металлов).

Анализ зависимости $\gamma=f(T)$ еще раз подтверждает возможность управления свойствами полупроводника путем введения в него примесей. Но это управление возможно только на

участке, соответствующем примесной электропроводности. А так как собственная электропроводность кремния и германия появляется при сравнительно низких температурах, то температурный диапазон большинства полупроводниковых приборов невелик (до 100—150°C). Для его расширения используют полупроводниковые материалы с широкой запрещенной зоной (в частности, SiC, GaP).

Экспериментальное исследование зависимости сопротивления полупроводника от температуры

Для того, чтобы экспериментально определить ширину запрещенной зоны полупроводника, необходимо построить зависимость проводимости полупроводника от температуры. Воспользуемся для этого схемой, изображенной на рис.3. На этой схеме ИП – регулируемый источник напряжения. R1 - резистор с малым температурным коэффициентом сопротивления. Вольтметр позволяет измерять падение напряжения на исследуемом диоде. Миллиамперметр предназначен для измерения тока протекающего через диод. Исследуемый диод помещен в нагревательную камеру. Температура в камере измеряется термометром.

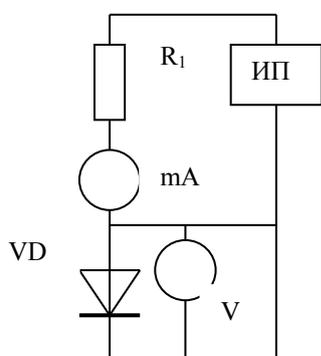


Рис.3

Измерения проводятся для прямой ветви ВАХ диода. В этом случае можно считать проводимость пропорциональной концентрации носителей заряда. Мы не будем учитывать влияния зависимости величины потенциального барьера от температуры.

Измеряемыми величинами являются температура полупроводникового диода, ток через диод и падение напряжения на диоде.

Напряжение на диоде устанавливается при комнатной температуре. Затем включается нагреватель и измеряются ток, напряжение и температура при нагреве. Измерения проводятся от комнатной температуры до 110°C. Результаты измерений заносят в таблицу и затем строят график зависимости $\log \gamma = f(1/T)$. Определяют угол наклона и вычисляют ширину запрещенной зоны по формуле (6).

Ток через диод и падение напряжения при комнатной температуре определяются типом диода, который исследуется, и задаются при наладке установки.

Сравнить полученную ширину запрещенной зоны и определить полупроводниковый материал.

T, [°C]	20	30	40	50	60	70	80	90
T, [K]								
U, [V]								
I, [A]								
R, [oM]								
$\gamma=1/R$								
$\log \gamma$								
1/T								

Для определения ширины запрещенной зоны полупроводника обратимся к формуле (3)

$$\ln \gamma = \ln \gamma_{0прим} - \frac{W_d}{2k} \cdot \frac{1}{T}$$

Перейдем от натуральных логарифмов к десятичным с помощью модуля перевода, который примерно равен 0.43; тогда:

$$\lg \gamma = \lg \gamma_0 - \frac{0,43W_d}{2k} \cdot \frac{1}{T}$$

Первый член правой части – постоянная величина; дробный множитель, стоящий перед 1/T, так же является постоянной величиной, следовательно, $\lg \gamma$ зависит только от обратной температуры, т.е. от 1/T. Выражение, связывающее их, представляет уравнение прямой. При

изучении температурной зависимости электропроводности какого-либо полупроводника ее удобно изображать графически. Откладывая по оси абсцисс разные значения $1/T$, а по оси ординат – соответствующие значения $\lg \gamma$, мы получим прямую линию, наклон которой определяется величиной $\frac{0,43W_d}{2k}$. С другой стороны, эта величина выражает собой $\operatorname{tg}\varphi$, где φ

- соответствующий угол, образованный горизонтальной координатной осью с прямой линией. Следовательно,

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{0,43}{2k}W_d$$

Так как численное значение $1/T$ для температур, с которыми обычно приходится иметь дело, слишком маленькая дробь, то по оси абсцисс удобнее откладывать не $1/T$, а $10^3/T$. Тогда мы будем оперировать с небольшими целыми числами.

Постоянная Больцмана k , встречающаяся в последней формуле, имеет размерность Дж/град, величину же W_d принято выражать в электрон-вольтах. Так как $1 \text{ эв} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, то окончательно для W_d получим следующее выражение:

$$W_d = 0,4 \operatorname{tg}\varphi [\text{эв}] \quad (6)$$

Измерив температурный ход удельной электропроводности реального полупроводника от самых низких температур до высоких и построив график зависимости $\lg \gamma$ от величины $10^3/T$, мы получим не прямую, а ломаную линию. Правая часть прямой до излома характеризует зависимость $\lg \gamma$ от $10^3/T$, когда в полупроводнике существует главным образом примесная проводимость. Наклон этого участка прямой определяется величиной энергии активации примесей W_1 . Точка излома соответствует тому моменту, когда все примеси истощены и наступает собственная проводимость. Левый прямолинейный участок после излома как раз и отвечает собственной проводимости полупроводника.

Контрольные вопросы

1. Чем определяется ширина запрещённой зоны полупроводника?
2. Какие значения имеет ширина запрещённой зоны для различных полупроводников?
3. Что такое донорные и акцепторные уровни?
4. Где находятся донорные и акцепторные уровни на энергетической диаграмме?
5. Как зависит от температуры ширина запрещённой зоны?

Основная литература

1. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника М., 1991
2. Власов А.Б. Физические основы электроники.
3. Носова Г.И., Задворный А.Г.. Физические основы электроники.
4. Бобылев Ю.Н. Физические основы электроники.
5. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники. Москва, “Высшая школа”, 1979.
6. Степаненко И.П.. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Москва, “Энергия”, 1977.
7. Блэйкмор Дж. Физика твёрдого тела. Москва, “Мир”, 1988.

Дополнительная литература

1. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. М., Радио и связь. 1985 504с.
2. Ефимчик М.К., Шушкевич С.С. Основы радиоэлектроники. Минск, изд-во Бел.Ун-та, 1986, 302 с.
3. Горелик С.С., Дашевский М.Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. М., Металлургия, 1988, 574 с.
4. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А.. Полупроводниковые приборы. М., Энергоатомиздат, 1990, 575 с.
5. Карлов Н. В. Лекции по квантовой электронике. М.. Наука 1988 335 с.