



040002. Исследование электропроводности полупроводников.

Цель работы: Определить сопротивление и его зависимость от температуры для полупроводникового материала. Установить тип материала и уровень его легирования.

Требуемое оборудование:

1. Измеритель электропроводности ИЭП1 – 1 шт.
2. Измерительная кассета – 1 шт.

Краткое теоретическое введение

Важнейшими материалами, которые наиболее широко применяются в электротехнике, являются полупроводники. Полупроводники представляют собой многочисленный класс материалов, в состав которого входят сотни разнообразных соединений. В него входят сотни разнообразных соединений. Полупроводниковыми свойствами обладают как неорганические, так и органические вещества, кристаллические и аморфные, твердые и жидкие, немагнитные и магнитные. Все это многообразие различных веществ объединено общим свойством – способностью сильно изменять свои электрические свойства под влиянием небольших внешних энергетических воздействий. Основу современной электроники составляют неорганические кристаллические полупроводники. Полупроводниковые свойства проявляют 12 химических элементов, находящихся в середине периодической системы Менделеева (табл. 1)

Таблица 1

Элемент	Ширина запрещенной зоны ΔE_g при 300 К, эВ	Подвижность μ_n/μ_p , см ² / (В·с)	Собственная концентрация носителей заряда n_{0i} , см ⁻³
Бор	1.6...1.9	1 / 150	–
Углерод (алмаз)	5.5	1800 / 1400	–
Кремний	1.12	1400 / 500	10 ¹⁰
Германий	0.665	3900 / 1900	2.5·10 ¹³
Олово (α -Sn)	0.09	0.11...2.7 / 0.2...3.6	4.2·10 ¹⁹
Фосфор	1.5	220 / 350	–
Мышьяк	1.2	40...500 / 50...1200	2.16·10 ²⁰
Сурьма	0.12	2400 / 1300	5.6·10 ¹⁵
Сера	2.5	7.5/10	–
Селен	1.8	–/40	10 ¹⁴
Теллур	0.36	1100/650	–

По совокупности электрофизических свойств, отработанности технологических процессов, количеству и номенклатуре выпускаемых приборов кремний и германий занимают ведущее место среди полупроводниковых материалов. Использующиеся в практике полупроводники могут быть подразделены на простые (образованы атомами одного химического элемента) и сложные (образованы атомами двух или большего числа химических элементов). Простые полупроводники представлены в табл. 1. Сложными полупроводниками являются соединения элементов различных групп таблицы Менделеева, соответствующие общим формулам $A^{IV}B^{IV}$ (SiC), $A^{III}B^{V}$ (InSb, GaAs, GaP), $A^{II}B^{VI}$ (CdS, ZnSe), а также некоторые оксиды и вещества сложного состава.

Общие представления зонной теории твердого тела указывают на то, что для полупроводников характерно наличие не очень широкой запрещенной зоны на энергетической диаграмме ΔE_g (см. табл. 1). Это приводит к тому, что при некоторой температуре из-за теплового возбуждения будет наблюдаться наличие свободных носителей как в зоне проводимости (электроны), так и в валентной зоне (дырки). Так как при каждом акте возбуждения в полупроводнике одновременно создаются два носителя заряда противоположных знаков, то общее число носителей будет в два раза больше числа электронов в зоне проводимости:

$$n_{0i} = p_{0i}; \quad n_{0i} + p_{0i} = 2n_{0i} \quad (1)$$

Такой полупроводник называется собственным, так как он не имеет примесей, влияющих на его электропроводность. Здесь индекс i означает концентрацию носителей в собственном полупроводнике. С учетом (1) удельная проводимость σ имеет вид

$$\sigma_i = en_{0i}\mu_n + ep_{0i}\mu_p = en_{0i}(\mu_n + \mu_p) \quad (2)$$

где e – заряд электрона;
 μ_n – подвижность электронов;
 μ_p – подвижность дырок.

При этом концентрации носителей заряда, называемые равновесными, определяются выражениями

$$\begin{aligned} n_{0i} &= N_c \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{k_B T}\right), \\ p_{0i} &= N_v \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{k_B T}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

где N_c , N_v – плотность энергетических уровней в зоне проводимости и в валентной зоне соответственно.

Подвижности носителей заряда μ_n , μ_p в выражении (2) неодинаковы из-за разности инерционных свойств носителей, проявляющихся в разной величине эффективных масс электронов и дырок.

В производстве большинства полупроводниковых приборов используются примесные полупроводники, в которых присутствие примеси приводит к изменению электропроводности полупроводника. По типу носителя заряда, появляющегося в полупроводнике из-за примесного атома, все примеси подразделяются на донорные и акцепторные. Сами полупроводниковые материалы подразделяются на электронные (полупроводник n-типа) и дырочные (полупроводник p-типа) по типу основных носителей заряда в объеме вещества (рис. 1).

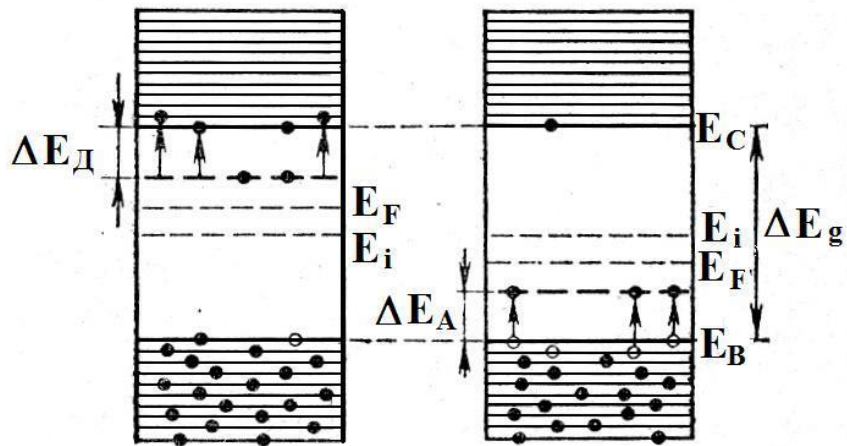


Рис. 1

Удельная проводимость согласно выражению (1) зависит от двух параметров: концентрации носителей заряда и их подвижности. Оба этих параметра имеют сложный характер зависимости от температуры.

Общий вид температурной зависимости концентрации носителей заряда в примесном полупроводнике показан на рис. 2. В области низких температур увеличение концентрации электронов при нагревании полупроводника обусловлено возрастанием количества ионизированной примеси. Это возрастание происходит по экспоненциальному закону, поэтому график низкотемпературного участка имеет линейный вид с наклоном, определяемым энергией ионизации примеси.

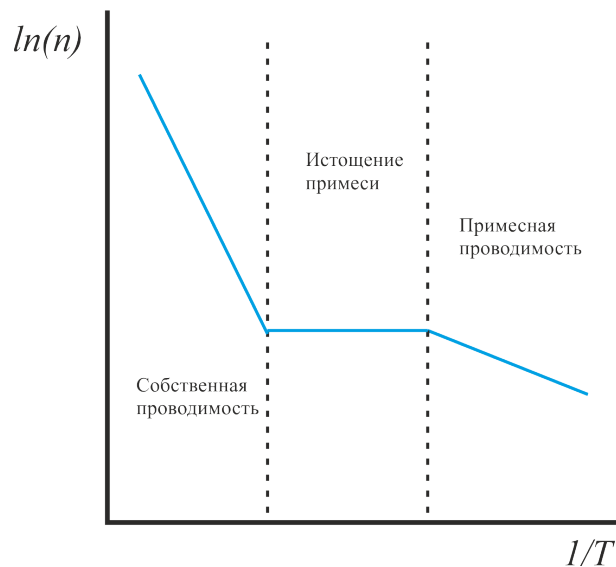


Рис. 2

При дальнейшем нагревании все примесные атомы оказываются ионизованными, а вероятность тепловой генерации носителей заряда за счет собственных атомов еще ничтожно мала. Поэтому в достаточно широком температурном интервале концентрация носителей заряда остается постоянной и равной концентрации доноров. Этот участок называют областью истощения примеси.

При высоких температурах доминирующую роль начинают играть процессы тепловой генерации собственных носителей заряда и зависимость переходит в область собственной электропроводности, где величина концентрации носителей определяется выражением (3), а наклон участка определяется величиной запрещенной зоны.

Подвижность носителей заряда также имеет сложную зависимость от температуры. Подвижность носителя заряда определяется как отношение средней установившейся скорости направленного движения к напряженности электрического поля:

$$\mu = \frac{\overline{V_{др}}}{E} \quad (4)$$

Удельная проводимость полупроводника имеет вид

$$\sigma = en_0\mu_n + ep_0\mu_p \quad (5)$$

Подвижность носителей заряда в полупроводниках с атомарной структурой, к которым относится большинство полупроводниковых материалов, определяется механизмами рассеяния. Такими механизмами рассеяния являются рассеяние на тепловых колебаниях решетки и рассеяние на ионизированных ионах примеси. Эти два механизма рассеяния приводят к появлению двух участков на температурной зависимости подвижности (рис. 3). На рис. 3 μ_a – подвижность носителей, связанная с рассеянием на тепловых колебаниях, а подвижность, связанная с рассеянием на ионизированных примесях, обозначена $\mu_{и}$. Очевидно, что два механизма рассеяния имеют сильно отличающиеся друг от друга зависимости от температуры.

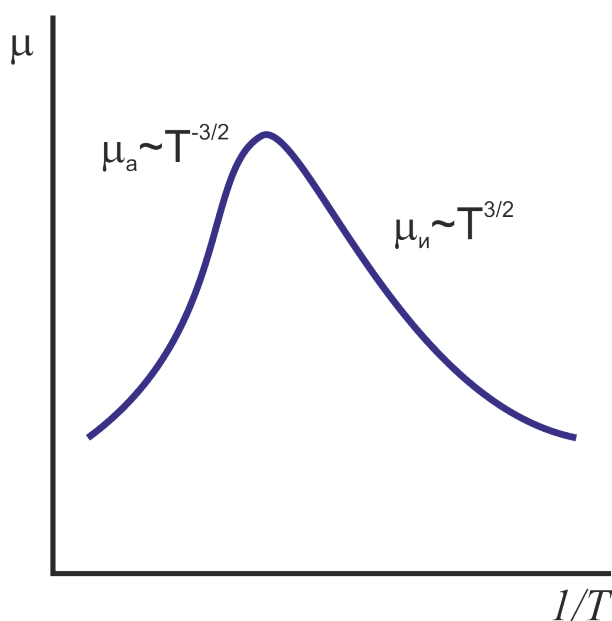


Рис. 3

Рассмотрев влияние температуры на концентрацию и подвижность носителей заряда, можно представить и общий ход изменения удельной проводимости при изменении температуры. Так как в полупроводниках с атомарной решеткой подвижность с температурой меняется по более слабому (по сравнению с экспоненциальным) степенному закону, то зависимость проводимости от температуры будет подобна температурной зависимости концентрации носителей заряда (рис. 4). На зависимости удельной проводимости также выделяют три характерных участка: область ионизации примеси (примесная проводимость), область истощения примеси и высокотемпературный участок собственной электропроводности (собственная проводимость), на котором наклон определяется величиной запрещенной зоны материала.

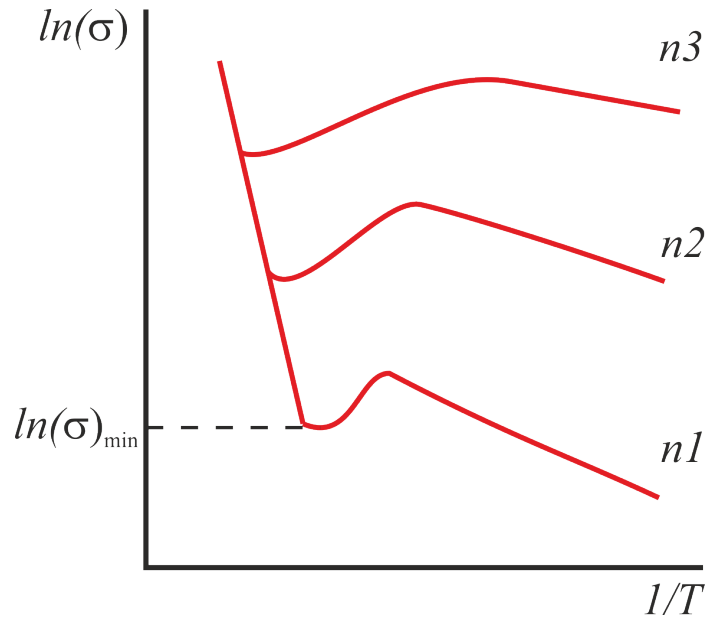


Рис. 4

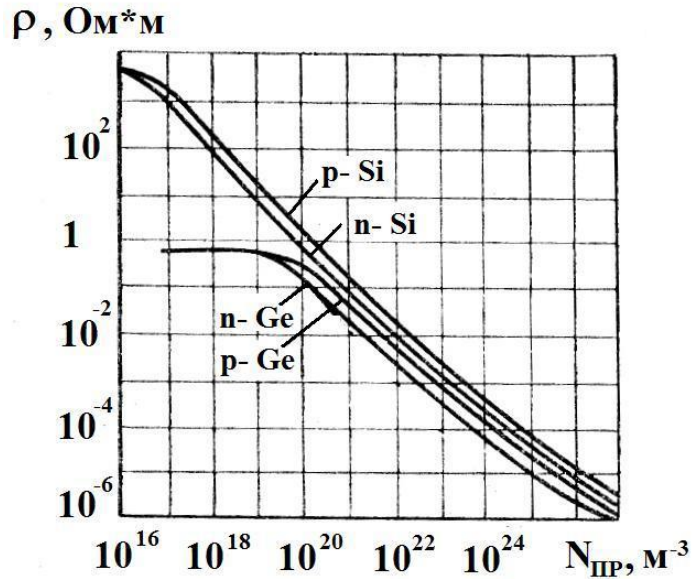


Рис. 5

Помимо температурной зависимости удельной проводимости практический интерес представляет также зависимость удельного сопротивления ρ полупроводника от концентрации примесных атомов (рис. 5). Эта зависимость устанавливается экспериментальным путем и используется при расчетах количества легирующей примеси, необходимой для выращивания полупроводникового монокристалла с требуемым удельным сопротивлением.

На рис. 4 можно выделить границу перехода к собственной проводимости. Эта граница характеризуется минимумом электропроводности σ_{\min} , имеющим место при некоторой температуре. Согласно (2), зная σ_{\min} , можно оценить собственную концентрацию носителей заряда n_{0i} : $\sigma_{\min} = \sigma_i = en_{0i}(\mu_n + \mu_p)$. Положение этой точки может изменяться довольно сильно и зависит как от концентрации легирующей примеси, так и от величины ширины запрещенной зоны полупроводника.

Методика проведения эксперимента

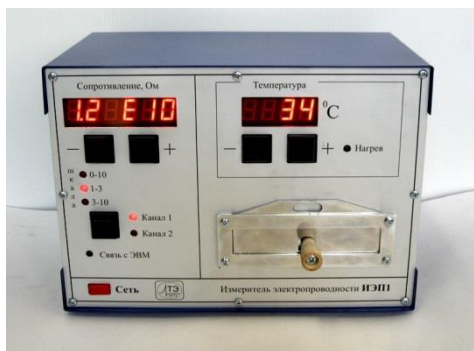


Рис. 6

Исследование зависимости сопротивления проводниковых материалов от температуры проводятся с помощью прибора ИЭП1 (рис. 6). Он содержит термокамеру, терморегулятор и измеритель сопротивлений в диапазоне $10 \dots 10^{13}$ Ом.

Применяемый в приборе метод измерения сопротивлений основан на сравнении измеряемого сопротивления и образцового сопротивления с помощью операционного усилителя, охваченного глубокой обратной связью (рис. 7). В приборе имеются два диапазона измерений и используются две шкалы – линейная и обратно пропорциональная. Измерения сопротивлений в диапазоне $10^2 \dots 10^6$ Ом проводятся по линейной шкале, а в диапазоне $10^7 \dots 10^{13}$ Ом – по обратно пропорциональной шкале.

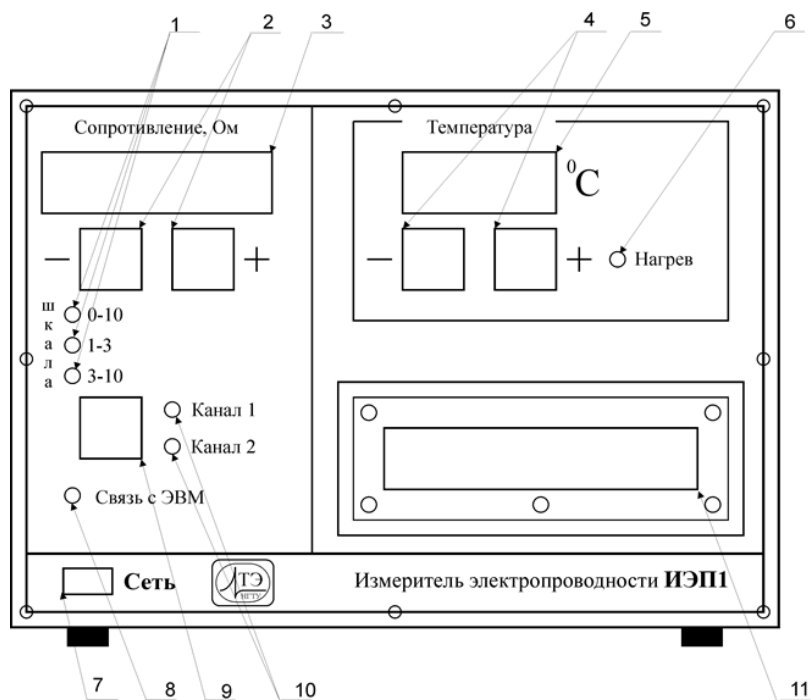


Рис. 7

На передней панели прибора расположены:

- 1 – индикатор шкалы;
- 2 – кнопки выбора поддиапазона;
- 3 – индикатор результата измерения;
- 4 – кнопки выбора температуры;
- 5 – индикатор температуры;
- 6 – индикатор нагрева;
- 7 – кнопка выключателя “Сеть”;
- 8 – индикатор связи с ЭВМ;
- 9 – кнопка переключения канала;
- 10 – индикатор выбора канала;
- 11 – термокамера.

Для включения прибора необходимо нажать кнопку 7 “Сеть” (рис. 7), при этом загорится индикатор результата измерения 3, индикатор выбора температуры 5, индикатор выбора канала 10.

Исследуемые образцы находятся в измерительной кассете ИК1. Для ее установки в прибор необходимо поднять шторку 11, установить кассету с образцами в термокамеру прибора до упора. При этом шторка должна опуститься.

Кнопками 2 устанавливается требуемый диапазон измерений.

Кнопкой 9 устанавливается требуемый канал для измерения. Контроль выбора канала осуществляется с помощью индикатора 10.

С помощью кнопок 4 устанавливается требуемое значение температуры термокамеры. При первом нажатии кнопки на индикаторе 5 высветится установленное значение температуры. При повторном нажатии кнопки произойдет коррекция устанавливаемой температуры. Через 2 секунды после завершения установки индикатор 5 перейдет в режим отображения текущей температуры.

Для отключения терморегулятора необходимо установить температуру менее 30⁰С. При этом на экране высветится сообщение “OFF”.

Примечание При работе прибора на индикаторе 1 могут отображаться следующие сообщения: “L” – измеряемое сопротивление ниже выбранного диапазона; “H” – измеряемое сопротивление выше выбранного диапазона.

Для исследуемых в работе образцов, имеющих сопротивление ниже 10⁶ Ом, измерения проводятся по линейной шкале. Для этого в приборе реализована схема рис. 8. Источник опорного напряжения $U_{ВХ}$ и образцовый резистор образуют искусственный генератор тока, а измеряемое сопротивление включается в цепь обратной связи.

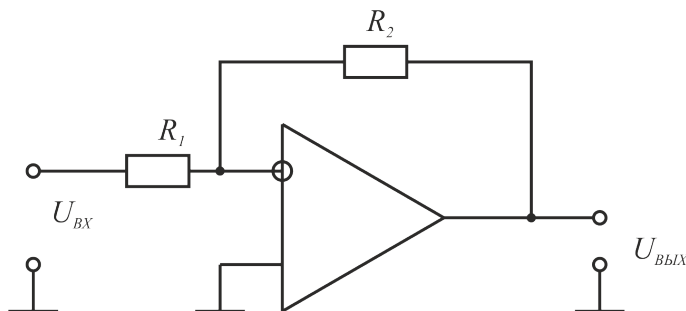


Рис. 8

Измеряемое сопротивление определяется по формуле:

$$R_2 = \frac{U_{ВЫХ} R_1}{U_{ВХ}}$$

- где R_2 – измеряемое сопротивление, Ом;
- R_1 – сопротивление образцового резистора;
- $U_{ВЫХ}$ – выходное напряжение усилителя;
- $U_{ВХ}$ – входное напряжение с источника сигнала.

Для определения удельной электропроводности можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{RS} \quad (6)$$

При относительно высоких температурах электропроводность полупроводника в области собственной проводимости равна:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-\Delta\varepsilon}{2k_b T}\right) \quad (7)$$

откуда для ширины запрещенной зоны получим формулу

$$\Delta\varepsilon = 2k_b \frac{d(\ln \sigma)}{d\left[\frac{1}{T}\right]}. \quad (8)$$

Рекомендуемое задание

1. Установите картридж в прибор. Включите кнопку 7 “Сеть” (рис. 2). Кнопкой 9 установите 1-й канал для измерения (по первому каналу расположен исследуемый полупроводник). Контроль выбора канала осуществляется с помощью индикатора 10. Кнопками 2 установите требуемый диапазон сопротивления.

2. Снимите зависимость R от температуры. Для этого с помощью кнопок 4 установите требуемое значение температуры термокамеры. Измерения сопротивлений производите по следующему температурному ряду: начальная, 40, 60, 80, 100⁰С. **Рекомендуется соблюдать интервал между измерениями 10 мин для стабилизации показаний прибора при нагреве образца.**

3. По полученным результатам определить тип материала. Для этого построить зависимость $\ln(\sigma) = f(1/T)$, и рассчитать величину ширины запрещенной зоны на высокотемпературном участке, взяв только две последние точки (60 – 100 С). При расчете использовать выражение (8). По табл. 1 найти материал, величина ширины запрещенной зоны которого лежит наиболее близко к расчетному значению.

4. Оценить собственную концентрацию носителей заряда. Для этого, используя зависимость $\ln(\sigma) = f(1/T)$ определить минимум удельной проводимости σ_{\min} . По рис. 5 оценить концентрацию легирующей примеси. Рассчитать собственную концентрацию носителей заряда, используя выражение (2). Данные для подвижностей взять из табл. 1.

Список используемых источников

Материаловедение. Конструкционные и электротехнические материалы. Материалы и элементы электронной техники. Практикум к лабораторным работам : учеб.-метод. пособие / И.Л. Новиков, Р.П. Дикарева, Т.С. Романова. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – 56 с.

февраль 2016

630092 г. Новосибирск пр. Карла Маркса 20, НГТУ,
НИЛ ТЕХНИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА (НИЛ ТЭ)
тел.: (383)-3460677
[http: www.nil.opprib.ru](http://www.nil.opprib.ru)
e-mail: lab@opprib.ru