

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОДВИЖНОСТИ ОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Цель работы: ознакомиться с методикой измерения температурной зависимости подвижности основных носителей заряда в полупроводниках, научиться измерять эту зависимость.

Приборы: лабораторная установка для измерения электропроводности и эффекта Холла в полупроводниках, образцы для измерений, потенциометр Р-307, источник питания УНИП-5, ЛАТР.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Свободными носителями заряда в твердых телах называют заряженные частицы, способные свободно перемещаться под действием внешнего электрического поля. В полупроводниках свободными носителями заряда являются электроны (отрицательно заряженные частицы) и дырки (положительно заряженные). Даже незначительное по величине внешнее электрическое поле вызывает их перемещение внутри полупроводника под действием кулоновской силы вдоль силовых линий поля.

Упрощенно поведение свободных носителей заряда в полупроводниках можно описать на основе классической электронной теории. Согласно классической электронной теории считается, что при малых концентрациях в полупроводнике электроны и дырки ведут себя как молекулы идеального газа. Они хаотически двигаются, испытывая столкновения с атомами решетки, но практически не сталкиваясь друг с другом (поскольку электроны и дырки имеют малые размеры по сравнению с атомами решетки). В результате между газом электронов и дырок и атомами решетки устанавливается тепловое равновесие: средние кинетические энергии частиц одинаковы по всему кристаллу полупроводника.

Под действием внешнего электрического поля электроны будут смещаться против поля, а дырки – по полю. Если напряженность внешнего электрического поля E будет постоянна, то в полупроводнике возникает направленное перемещение электронов и дырок с некоторой постоянной скоростью, то есть возникает и будет поддерживаться постоянный электрический ток.

Величина кулоновской силы, действующей на электрон, составляет $F = -eE$, где $-e$ – заряд электрона. Под действием этой силы электрон движется с ускорением, набирая скорость, пока не столкнется с атомом решетки. Считается, что при столкновении он отдает атому всю набранную кинетическую энергию и начинает снова ускоренно двигаться против поля с нулевой начальной скоростью. Энергия, отданная атому решетки, переходит в энергию колебаний атома, (то есть в тепловую энергию атомов решетки).

В результате многочисленных столкновений электрона с атомами решетки его движение будет напоминать движение льдины во время ледохода. Поэтому такое движение называют дрейфом. При таком движении электрон хаотически «мечется» и постепенно «сносится» силами электрического поля с некоторой средней скоростью, называемой скоростью дрейфа v_d . В первом приближении предполагается, что скорость дрейфа пропорциональна напряженности электрического поля в полупроводнике:

$$v_d = \mu E \quad (1)$$

где μ – коэффициент пропорциональности, называемый подвижностью электронов в полупроводнике. Фактическая подвижность численно равна скорости дрейфа электрона в электрическом поле с напряженностью 1 В/м.

Зная подвижность электронов, можно рассчитать проводимость σ полупроводника по известной формуле :

$$\sigma = en\mu \quad (2)$$

Подвижность основных носителей заряда является важной физической величиной, характеризующей электронные свойства полупроводника. Измерения подвижности и ее зависимостей от температуры, концентрации носителей и других факторов, позволяет делать выводы о поведении электронов и дырок в

полупроводниках и определять многие электронные параметры материала. Поэтому представляет интерес теоретически рассчитать величину подвижностей носителей. Проведем расчет μ для электронов.

Как показано выше, движение электрона в полупроводнике под действием внешнего электрического поля представляет серию скачков от соударения к соударению. В промежутках между соударениями электрон движется с ускорением. Величина этого ускорения легко определяется. Поскольку со стороны поля на электрон действует сила $F=eE$, то

$$A=F/m=eE/m \quad (3)$$

Где m эффективная масса электрона.

Средняя скорость электрона на участке между двумя столкновениями может быть определена как $v=at/2$, где τ - среднее время свободного пробега. Тогда получаем:

$$v=e\tau E/2m \quad (4)$$

Отсюда следует, что

$$\mu=e\tau/2m \quad (5)$$

Зависимость подвижности от температуры происходит за счет зависимости τ от температуры. Расчеты показывают, что при столкновениях электронов с нейтральными атомами решетки τ уменьшается с повышением температуры пропорционально степени $3/2$, что приводит к степенной зависимости подвижности от температуры по закону:

$$\mu=\mu_0 T^{-3/2} \quad (6)$$

Если преобладают столкновения электронов с ионами в решетке полупроводника, то расчеты дают возрастание τ и μ с ростом температуры по закону:

$$\mu=\mu_0 T^{3/2} \quad (7)$$

На практике в реальных полупроводниках подвижность носителей заряда при невысоких их концентрациях обычно ограничена только указанными двумя факторами. При высоких температурах преобладает рассеяние на нейтральных атомах решетки, поскольку их подавляющее большинство и амплитуда их

колебаний велика. С понижением температуры амплитуда тепловых колебаний атомов решетки уменьшается, рассеяние уменьшается и подвижность растет. При достаточно низких температурах рассеяние на нейтральных атомах практически исчезает. В этой области температур подвижность начинает определяться рассеянием на ионизированных атомах примесей или дефектов. Поэтому в области очень низких температур подвижность начинает падать с понижением температуры. Чем больше концентрация ионизированных примесных атомов, тем раньше начинается падение подвижности. В итоге температурная зависимость подвижности электронов в полупроводнике имеет вид, представленный на рис.1.

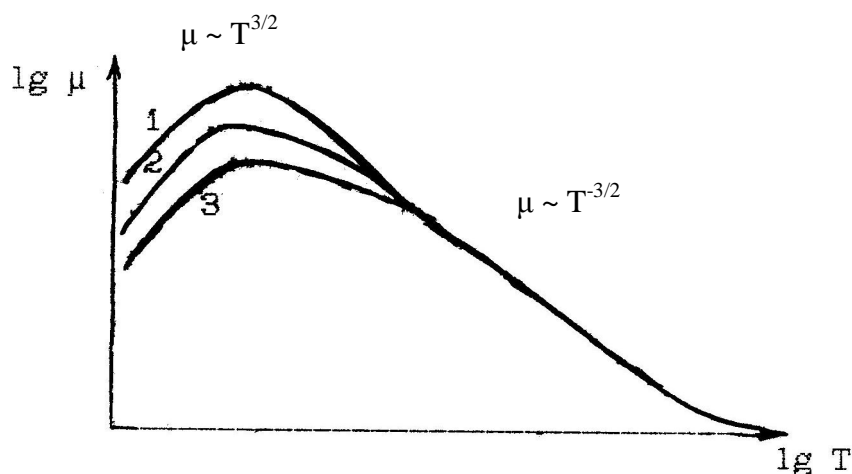


Рис. 1. Теоретические зависимости подвижности основных носителей заряда в полупроводнике от температуры при различных концентрациях N ионизированных атомов примеси ($N_1 > N_2 > N_3$).

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА.

Измерения подвижности основных носителей заряда проводится в настоящей работе путем совместного измерения электропроводности и эффекта Холла по методике, подробно изложенной в предыдущей работе (смотри описание к

лабораторной работе №4 «Эффект Холла в полупроводниках»). Для измерений используется образец полупроводника размером $1 \times 5 \times 10$ мм с пятью омическими контактами (рис.2). Два крайних омических контакта (контакты 1,2) выполнены в виде полосок и служат для создания электрического тока в образце (токовые контакты). Между ними расположены три омических контакта в виде круглых точек. Два из них (контакты 3 и 4) расположены вдоль образца, по одному краю и предназначены для измерения удельной электропроводности, а третий точечный контакт (контакт 5) расположен с другого края образца и предназначен для измерения эффекта Холла. Образец помещается в магнитное поле, созданное постоянным магнитом и через него пропускается ток заданной силы J . Измерения сводятся к определению силы тока J через образец и измерению величины напряжений между контактами 3 и 4 (напряжение U_0), а также и между контактами 3 и 5 (напряжение U_x).

Из полученных данных вычисляются коэффициент Холла R и удельная проводимость σ по следующим формулам:

$$R = \frac{U_x d * 10^8}{J * B} \quad (\text{см}^3/\text{Кл}); \quad \frac{1}{\sigma} = \frac{U_\sigma S}{J * L} \quad (\text{Ом*см}) \quad (8)$$

Здесь d – толщина образца (см), S – площадь сечения образца (см^2), L – расстояние между контактами 3 и 4 (см), J – сила тока через образец (А), B – индукция магнитно поля (Тл).

Величина подвижности μ основных носителей заряда (в данном случае электронов) определяется по формуле

$$\mu = R * \sigma \quad (9)$$

Измерения выполняются несколько раз при различных температурах. Для задания температуры образца используется трубчатый нагреватель, в который вставляется держатель с измеряемым образцом. Нагреватель под действием проходящего через него тока разогревается, повышая температуру образца до заданной величины. Температура образца измеряется с помощью термопары, помещенной около образца. ЭДС термопары определяется специальным милливольтметром или потенциометром постоянного тока. Из величины U_T

термо – ЭДС термопары с помощью градуировочной таблицы определяется температура T образца. Поскольку холодный спай термопары содержится при комнатной температуре, к полученной T необходимо прибавить значение комнатной температуры.

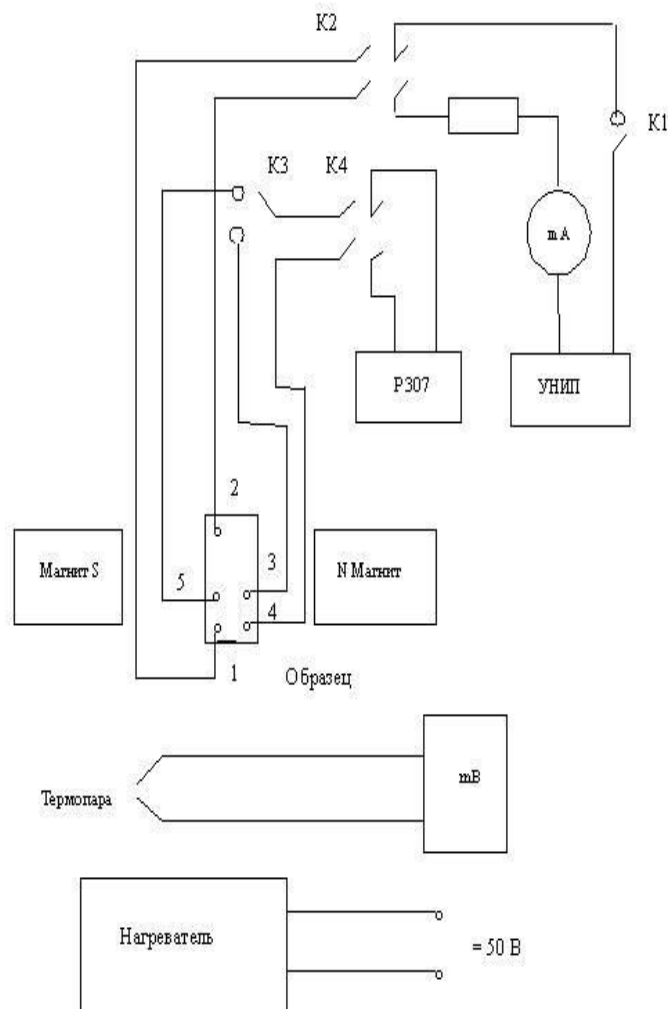


Рис. 2. Электрическая схема лабораторной установки для измерения температурной зависимости подвижности основных носителей в полупроводниках.

ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Электрическая схема лабораторной установки для измерения температурной зависимости подвижности основных носителей заряда в полупроводниках

приведена на рис. 2. Установка включает постоянный магнит, нагреватель образца, измеряемый образец с держателем, схему задания и измерения тока через образец и схему измерения напряжений на контакте образца. В настоящей установке используется магнит, создающий постоянное магнитное поле величиной $7000 \text{ Э} = 0,7 \text{ Тл}$.

Между полюсами постоянного магнита расположен трубчатый нагреватель, внутри которого размещается держатель с измеряемым образцом. Нагреватель питается от понижающего трансформатора и потребляет ток $0,10 - 0,15 \text{ А}$ при напряжении $50 - 70 \text{ В}$, обеспечивая нагрев образца до 150°С . Более высокая температура может привести к расплавлению омических индиевых контактов на образце.

изменяемый образец представляет собой пластинку полупроводника размером $1*5*10 \text{ мм}$ с пятью омическими контактами. Схема расположения контактов показана на рис. 2. Для образцов из арсенида галлия в качестве омических контактов используется обычно индий или олово. Индий применяется как на дырочном, так и на электронном материале, а олово – только на электронном материале. В качестве омических контактов возможно также применение напыленных (или осажденных электрохимическим методом) пленок серебра или золота с последующим их вжиганием в вакууме.

Схема задания и измерения тока через образец обеспечивает прохождение постоянного тока J величиной $10 - 40 \text{ мА}$ через контакты 1 и 2 измеряемого образца. Схема содержит выключатель $K1$ для включения и выключения тока через образец, переключатель направления тока $K2$, ограничительное сопротивление $R1$ (50 Ом), миллиамперметр мА (со шкалой до 50 мА) и источник питания типа УНИП, обеспечивающий постоянное напряжение, регулируемое в пределах $5 - 10 \text{ В}$.

Схема измерения напряжений предназначена для измерения ЭДС Холла U_x между контактами 5 и 3, а также падения напряжения U_σ между контактами 3 и 4 измеряемого образца. Эти напряжения могут составлять от долей мВ (U_σ) до долей вольт (U_x). Для их измерения используется либо многопредельный

милливольтметр, либо потенциометр постоянного тока типа Р307. Последний предпочтительней, поскольку обеспечивает более высокую точность измерения. Схема включает также переключатель К4 для переключения полярности измеряемого напряжения, подаваемого на потенциометр Р307, и переключатель К3, предназначенный для подключения потенциометра либо к контактам 4, 5 (при измерении U_{σ}), либо к контактам 3, 4 (при измерении U_x).

Все переключатели, миллиамперметр и ограничительное сопротивление расположены в измерительном блоке размером 100*180*250 мм. Общий вид передней панели стенда показан на рис. 3. В правом верхнем углу панели расположен миллиамперметр, измеряющий ток J через образец, под ним расположены переключатели К2, К3, К4 и выключатель К1. Внутри блока размещены ограничительное сопротивление R1 и понижающий трансформатор для питания нагревателя образца.

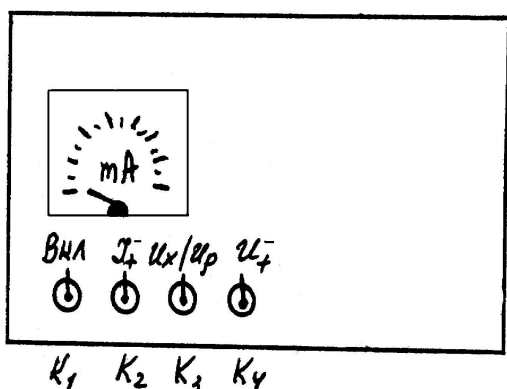


Рис. 3. Общий вид передней панели измерительного блока лабораторной установки для измерения температурной зависимости подвижности основных носителей заряда в полупроводниках.

ЗАДАНИЯ НА РАБОТУ

Задание 1. Поставить в держатель установки образец электронного арсенида галлия с малой концентрацией ($n=3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) электронов и измерить температурную зависимость подвижности электронов в нем. Построить график

полученной зависимости, сравнить с теоретически ожидаемой кривой и объяснить полученные результаты. Рассчитать ошибки измерений.

Задание 2. Помещая в держатель образцы арсенида галлия n – типа с различной концентрацией электронов (от 10^{16} до 10^{19} см⁻³), измерить температурные зависимости подвижности электронов в них. Построить экспериментально измеренные графики зависимостей μ (Т) для каждого образца, сравнить их с теоретически ожидаемыми и объяснить полученные результаты.

Задание 3. Измерить температурные зависимости подвижности основных носителей для нескольких образцов дырочного арсенида галлия с различной исходной концентрацией дырок (от 10^{17} до 10^{20} см⁻³). По полученным результатам построить графики зависимостей μ (Т) для каждого образца, сравнить их литературными данными и объяснить. Рассчитать ошибки измерения.

Задание 4. Измерить температурные зависимости подвижности основных носителей заряда для ряда различных полупроводников (германий, арсенид галлия, арсенид индия и другие) электронного типа проводимости. Построить в виде графиков экспериментальные зависимости μ (Т) для измеренных образцов, сравнить с литературными данными и объяснить их.

ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Подготовить потенциометр Р307 к работе. Для этого подключить батарею, нормальный элемент и гальванометр к соответствующим клеммам потенциометра. Необходимо также установить рабочий ток потенциометра. Порядок подготовки к работе и проведения измерений на Р307 изложен в инструкции к потенциометру.
2. Вставить выбранный образец полупроводника в держатель и закрепить держатель между полюсами магнита в нагревателе. Проверить правильность присоединения источника питания и потенциометра к измерительному блоку. Включить источник питания (УНИП или подобный ему) и установить напряжение 5 В. Включить ток через образец с помощью выключателя К1 на передней панели блока. Регулируя напряжение источника питания,

установить заданную величину тока через образец (обычно 10 – 40 мА). Если ток отсутствует, проверьте правильно ли вставлен измеряемый образец в держатель, хорошо ли прижаты контактные пластинки к омическим контактам образца.

3. Переключателем К2 задайте необходимое направление тока через измеряемый образец. Переключатель К3 поставьте в положение U_{σ} и проведите измерения величины напряжения U_{σ} . Порядок проведения измерений напряжений потенциометром Р307 изложен в инструкции к потенциометру. Если сбалансировать потенциометр не удастся, переключите полярность напряжения переключателем К4. Результаты измерения занесите в таблицу.

4. Поставьте переключатель К3 в положение U_x и проведите измерение напряжения U_x . Результат занесите в таблицу измерений.

Переключите полярность тока через образец с помощью переключателя К2 и повторите измерения U_{σ} и U_x . Запишите результаты в таблицу.

5. Подайте напряжение питания на нагреватель образца (не более 50 В) и, измеряя ЭДС термопары U_T , определяйте температуру образца. Проводите измерения U_{σ} и U_x через каждые 20° С и результаты заносите в таблицу. После окончания измерений выключите ток через образец и выключите все электроприборы установки.

6. Вычислите по формулам (8, 9) величину подвижности μ при каждой температуре и постройте график зависимости $\mu(T)$. При расчетах нужно учитывать, что $d = 1$ мм, $L = 5$ мм, $S = 5 \cdot 10^{-2}$ см².

7. Рекомендуемый вид таблицы измерений:

U_T , мВ	Т К	J, мА	U_{σ} мВ	U_x мВ	R, см ³ /Кл	σ , 1/Ом*см	μ , см ² /В*с

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Изложите основные положения классической теории полупроводников.

2. Дайте определение подвижности носителей заряда в полупроводниках.
3. Как подвижность носителей заряда μ связана со средним временем их пробега τ ?
4. Перечислите основные виды рассеяния носителей заряда в полупроводниках.
5. Как подвижность основных носителей заряда зависит от температуры при различных видах рассеяния?
6. Нарисуйте и объясните график обычной зависимости $\mu(T)$ для основных носителей заряда в полупроводниках.
7. Опишите основные узлы и элементы измерительной установки.
8. Изложите порядок выполнения работы и подсчета ошибок измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шалимова К. В. Физика полупроводников, М., Энергия, 1976, 416 с.
2. Павлов Л. П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов, М., Высш. шк., 1975, 206 с,
3. Остробородова В. В., Егоров В. Д. Спецпрактикум по физике полупроводников, ч. 1, М., МГУ, 1974, 76 с,
4. Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам, под ред. Шалимовой К.В. М., 1976