

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 15.05.2022 01:43:25
Уникальный программный ключ:
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabb73e943df4a4851fda56d089

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра нанотехнологий, общей и прикладной физики

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
Локтионова
О.Г.
« 15 » 05 2022 г.



ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОННОМ ИСПОЛНЕНИИ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов направления подготовки
28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Курск 2021

УДК 532.74

Составители: П.А. Ряполов, Е.В. Шельдешова

Рецензент

Кандидат физико-математических наук, доцент *А.Е. Кузько*

Датчики физических измерений в микро- и наноэлектронном исполнении: методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направления подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: П.А. Ряполов, Е.В. Шельдешова. Курск, 2021. 50 с.: Библиогр.: с. 50

Излагаются методические указания по выполнению лабораторных работ, в которых рассматриваются: статистическая обработка результатов измерений, изучение современного цифрового осциллографа, измерение параметров электрических цепей, исследование температурной зависимости электросопротивления металлов, эффект Зеебека и эффект Холла в полупроводниках. Содержатся краткие теоретические сведения, описание экспериментальных установок и методик измерений, задания, вопросы для контроля знаний и список литературы.

Методические указания соответствуют требованиям Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования и учебных планов направлений подготовки 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника, степень (квалификация) – бакалавр. Предназначены для студентов всех форм обучения. Материал также будет полезен студентам всех других направлений подготовки, изучающим дисциплины нанотехнологического цикла.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *15.01.21* Формат 60 x 84 1/16.

Усл. печ. л. 2,9. Уч.-изд. л. 2,63. Тираж 50 экз. Заказ *194* Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

Лабораторная работа №1. «Статистическая обработка результатов измерений».....	4
Лабораторная работа №2. «Изучение современного цифрового осциллографа».....	17
Лабораторная работа №3. «Измерение параметров электрических цепей».....	32
Лабораторная работа №4. «Исследование температурной зависимости электросопротивления металлов».....	37
Лабораторная работа №5. «Эффект Зеебека».....	42
Лабораторная работа №6. «Эффект Холла в полупроводниках».....	46

Статистическая обработка результатов измерений

Цель работы: изучить классификацию методов измерения и обработки данных; изучить источники и классификацию ошибок определения значения измеряемой величины; изучить методы определения доверительного интервала, полученных прямыми - непосредственными измерениями.

Приборы и принадлежности: набор резисторов, мультиметр FLUKE-15b

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

I. Измерение физических величин и классификация погрешностей.

Физическая величина это свойство (характеристика) материальных объектов и процессов, которое можно прямо или косвенно измерить.

Основные физические величины: длина, время, масса, температура, сила тока, количество вещества, сила света.

Производные физические величины - получают с помощью основных величин используя выражения для законов природы, либо путем целесообразного определения через умножение или деление основных величин.

Обозначения физических величин – специальные символы. В соответствии с международными соглашениями введены соответствующие стандарты на обозначения физических и технических величин. Принято набирать обозначения физических величин *курсивом*.

Квадратные скобки [], содержащие обозначение величины, означают единицу измерения величины, например, выражение $[U] = В$ читается следующим образом: «Единица измерения напряжения равна вольту».

Фигурные скобки { }, содержащие обозначения величины, означают «численное значение величины», например выражение $\{U\} = 220 В$.

Скалярные физические величины – полностью характеризуются численным значением и единицей измерения физической величины.

Векторные физические величины – полностью характеризуются численным значением, единицей измерения и направлением.

Размерность физической величины называется соотношение, показывающее, как изменяется единица измерения этой величины при изменении основных единиц измерения. Она устанавливает связь между физической величиной с основными величинами. Представляет собой произведение степеней размерностей основных величин.

Формула размерности какой-либо физической величины имеет вид:

$$L^{\alpha} \cdot M^{\beta} \cdot T^{\gamma},$$

где показатели степени α , β , γ это положительные или отрицательные рациональные числа, в частности они, могут быть равными нулю.

Правило размерностей - так как физические законы не зависят от выбора единиц измерения, входящих в них физических величин, то размерности обеих частей уравнений этих законов должны быть одинаковыми. Правило размерностей используется для проверки правильности полученного результата. Иногда это правило используется для установления размерности коэффициентов пропорциональности, имеющих определенный физический смысл, входящих в математическое отображение физических законов.

Уравнение для физических величин – связь между физическими величинами, выражающаяся математическим уравнением.

Уравнение для величин – не зависит от выбранной системы единиц измерения физических величин и принципиально справедливы.

"Приведенные" уравнения – содержит константы и материальные постоянные, с выбранными заранее соответствующими единицами измерения и подсчитанные повторяющиеся численные значения.

Системы единиц измерения физических величин - это совокупность основных и производных единиц измерения (эталонов).

Эталоны (единицы измерения) физических величин должны удовлетворять следующим требованиям: легко воспроизводиться в любом количестве; должны быть удобными при использовании в практической деятельности.

Основные эталоны это несколько эталонов для некоторых величин.

Производные эталоны это эталоны всех остальных величин, которые получают, пользуясь физическими законами.

Дополнительные эталоны вводят по мере необходимости.

Международная система единиц измерения физических величин (СИ) – принята в 1960 году. Система СИ принадлежит к числу абсолютных систем. В табл. 1 приведены физические величины и их единицы измерения в системе СИ.

Таблица 1. Величины и единицы измерения в системе СИ

Физическая величина	Обозначение	Единица измерения	Обозначение единицы измерения
Основные единицы измерения			
Длина	L	Метр	м
Масса	M	Килограмм	кг
Время	T	Секунда	с
Сила электрического тока	I	Ампер	А
Температура	T	Кельвин	К
Количество вещества	V	Моль	моль
Сила света	I _v	Кандела	Кд

Дополнительные единицы измерения			
Плоского угла	φ	Радиян	рад
Телесного угла	θ	Стерadian	стерад

Единица длины - метр равен длине отрезка, которую свет проходит в вакууме за $1/299792458$ долю секунды.

Единица массы - килограмм равен массе международного эталона, представляющего собой цилиндр, состоящий из сплава платины и иридия (90% Pt + 10% Ir), диаметром $\varnothing=39$ мм и высотой $h=39$ мм.

Единица времени - секунда равна 9192631770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Единица силы электрического тока - ампер равен силе постоянного электрического тока, который, протекая по двум прямолинейным параллельным бесконечно длинным проводникам ничтожно малого сечения, находящимися в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, вызывает на участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия между ними $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Единица температуры - кельвин, равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

Единица количества вещества - моль представляет количество вещества в системе, содержащей столько же частиц, сколько атомов содержится в $0,012$ килограмма изотопа углерода ^{12}C . В количестве вещества, равном 1 моль, содержится $6,022 \cdot 10^{23}$ структурных элементов, в качестве которых могут выступать атомы, молекулы, ионы, электроны и другие частицы с точно заданными параметрами.

Единица силы света - кандела это сила света источника, монохроматическое излучение которого частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, излучаемое в определенном направлении в телесный угол 1 стерадиан, имеет мощность $1/683$ Вт.

Единица измерения плоского угла – радиан. Один радиан (рад) равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу ($1 \text{ рад} = 57^{\circ} 17' 44,8''$)/

Единица измерения телесного угла – стерадиан. Один стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равновеликой радиусу сферы ($1 \text{ ср} = 7,96 \cdot 10^{-2}$ полного телесного угла (сферы)).

Измерить какую-либо величину – значит узнать сколько однородных величин, принятых за единицу измерения, содержится в измеряемой величине.

Методы определения численного значения измеряемой величины: метод прямых измерений; метод косвенных измерений.

Метод прямых (непосредственных) измерений – измеряемая величина определяется непосредственным путем сравнения ее с эталоном.

Метод косвенных измерений - измеряемая величина определяется методом математических операций над величинами, значение которых предварительно определяется прямыми измерениями.

Среднее значение измеряемой величины – наиболее близкое значение измеряемой величины к ее истинному значению. Среднее арифметическое значение измеряемой величины, результатов отдельных измерений:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

где x_i - численное значение величины каждого измерения;

n – число измерений.

Погрешности или ошибки измерений: систематические, случайные и грубые (промахи, просчеты). Определение погрешностей позволяет вычислить вероятность того, что истинное значение измеряемой величины окажется в том или ином интервале значений.

Систематические ошибки – обусловлены главным образом погрешностями средств измерения и несовершенством методов измерений. Систематические ошибки обычно дают отклонение результата от истинного значения измеряемой величины только в одну сторону, либо в сторону ее увеличения, либо в сторону ее уменьшения.

Случайные ошибки – являются следствием случайных, неконтролируемых помех, влияние которых на процесс измерений невозможно учесть непосредственно. Они могут возникать по вине экспериментатора или по причинам, которые заранее нельзя учесть. Эти ошибки приводят к отклонению результата измерений в обе стороны, то, увеличивая, то, уменьшая его. Теория погрешностей учитывает только случайные погрешности. Согласно этой теории, случайные погрешности подчиняются закону нормального распределения (закону Гаусса). С помощью закона распределения хотя и невозможно определить истинное значение измеряемой величины, но можно определить вероятность того, что истинное значение окажется в любом интервале значений, доверительном интервале

$$a < x_0 < b$$

По закону Гаусса эта вероятность определяется функцией плотности распределения

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\langle x \rangle)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

и равна

$$p(a < x_0 < b) = \int_a^b f(x) \cdot dx,$$

где x – набор значений измеряемой величины, полученный в результате измерений;

$\langle x \rangle$ - их среде арифметическое значение;

σ - средне квадратичное отклонение:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ;$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n-1}} .$$

Промахи или просчеты – это ошибки, возникающие в результате небрежности отсчета по приборам или неразборчивости в записи их показаний.

Погрешности (ошибки) измерений. Определение погрешностей при прямых измерениях: абсолютных и относительных.

Абсолютная погрешность отдельных измерений – разность между истинным значением измеряемой величины (на практике средним значением) и значениями той же величины, полученные при отдельных измерениях

$$\Delta x_1 = \bar{x} - x_1; \Delta x_2 = \bar{x} - x_2; \Delta x_3 = \bar{x} - x_3; \dots; \Delta x_n = \bar{x} - x_n. \quad (3)$$

Средняя абсолютная погрешность – среднее арифметическое абсолютных значений (модулей) отдельных абсолютных погрешностей:

$$\Delta \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i| \quad (4)$$

Относительная погрешность (ошибка) отдельных измерений – отношение абсолютной погрешности отдельного измерения к истинному значению (среднему значению) измеряемой величины

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta x_1}{\bar{x}_1}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\Delta x_2}{\bar{x}_2}; \quad \varepsilon_3 = \frac{\Delta x_3}{\bar{x}_3}; \quad \dots; \quad \varepsilon_i = \frac{\Delta x_i}{\bar{x}_i} .$$

Средняя относительная погрешность (ошибка) результата измерений – отношение средней абсолютной погрешности к среднему значению измеряемой величины

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\Delta \bar{x}}{\bar{x}} \quad (5)$$

Истинное значение измеряемой величины – интервал, в котором находится истинное значение измеряемой величины:

$$x_{\text{ист}} = \bar{x} \pm \Delta \bar{x} \quad (6)$$

или

$$x_{\text{ист}} = \bar{x} \pm \Delta x_{\text{T}},$$

где Δx_{T} – наиболее вероятная ошибка результата измерений.

Определение погрешностей при косвенных измерениях.

Средняя абсолютная погрешность при косвенных измерениях:

$$\langle \Delta x \rangle = \langle \varepsilon \rangle \cdot \langle x \rangle,$$

где $\langle \varepsilon \rangle$ - средняя относительная погрешность;

$\langle x \rangle$ - среднее арифметическое значение измеряемой величины.

Средняя относительная погрешность при косвенных измерениях определяется так:

1. Расчетную формулу необходимо прологарифмировать.

2. От полученного соотношения взять полный дифференциал.

3. Заменить знаки "d" на знаки "Δ"; заменить знаки "-" на знаки "+".

Например, для определения средней относительной погрешности при определении плотности твердого тела в данной работе (рис. 1) необходимо провести указанные операции с расчетной формулой

$$\langle \rho \rangle = \frac{4 \langle m \rangle}{\pi (\langle D \rangle)^2 \langle h \rangle},$$

где $\langle m \rangle$ - среднее значение массы исследуемого образца;

$\pi = 3,14$ = значение числа π ;

$\langle D \rangle$ - среднее значение диаметра исследуемого образца цилиндрической формы;

$\langle h \rangle$ - среднее значение исследуемого образца.

После логарифмирования получим:

$$\ln \langle \rho \rangle = \ln 4 + \ln \langle m \rangle - \ln \pi - 2 \ln \langle D \rangle - \ln \langle h \rangle.$$

Полный дифференциал от полученного соотношения:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{d\rho}{\langle \rho \rangle} = \frac{dm}{\langle m \rangle} - \frac{d\pi}{\pi} - 2 \frac{dD}{\langle D \rangle} - \frac{dh}{\langle h \rangle}.$$

Окончательно имеем:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\langle \Delta \rho \rangle}{\langle \rho \rangle} = \frac{\langle \Delta m \rangle}{\langle m \rangle} + \frac{\Delta \pi}{\pi} + 2 \frac{\langle \Delta D \rangle}{\langle D \rangle} + \frac{\langle \Delta h \rangle}{\langle h \rangle}$$

или

$$\langle \varepsilon \rangle = \langle \varepsilon_{\rho} \rangle = \langle \varepsilon_m \rangle + \varepsilon_{\pi} + 2 \langle \varepsilon_D \rangle + \langle \varepsilon_h \rangle,$$

где $\langle \varepsilon_{\rho} \rangle$ - среднее значение относительной погрешности плотности вещества;

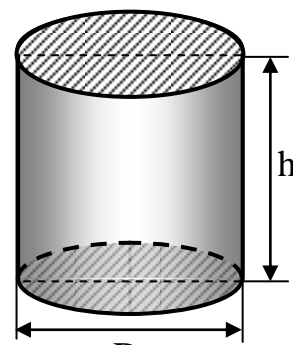


Рисунок 1

$\langle \Delta m \rangle$ - среднее значение абсолютной погрешности при определении массы исследуемого образца;

$\langle \varepsilon_m \rangle$ - среднее значение относительной погрешности при определении массы исследуемого образца;

$\Delta \pi$ - значение абсолютной погрешности числа π , которое может быть задана;

ε_π - значение относительной погрешности числа π ;

$\langle \Delta D \rangle$ - среднее значение абсолютной погрешности при определении диаметра исследуемого образца;

$\langle \varepsilon_D \rangle$ - среднее значение относительной погрешности при определении диаметра исследуемого образца;

$\langle \Delta h \rangle$ - среднее значение абсолютной погрешности при определении высоты исследуемого образца;

$\langle \varepsilon_h \rangle$ - среднее значение относительной погрешности при определении высоты исследуемого образца.

Примечание. Если абсолютные погрешности, полученные при измерениях величин входящих в расчетную формулу, окажутся меньше, чем приборная погрешность, то при определении относительной погрешности подставляются приборные погрешности.

Зная величину относительной погрешности " ε_ρ " и среднее значение плотности $\langle \rho \rangle$ для абсолютной погрешности получим:

$$\langle \Delta \rho \rangle = \langle \varepsilon_\rho \rangle \cdot \langle \rho \rangle.$$

Истинное значение величины плотности вещества исследуемого образца находится в интервале

$$\rho = \langle \rho \rangle \pm \langle \Delta \rho \rangle.$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1

Определить величину случайной ошибки методом среднего арифметического согласно следующего алгоритма

1. С помощью мультиметра определить сопротивление каждого резистора, выданного преподавателем.

2. С помощью формулы (1) определить среднее значение сопротивления резисторов.

3. Оценить величину абсолютной погрешности для каждого измерения и определить среднее значение абсолютной погрешности – формулы (3) и (4) соответственно.

4. Рассчитать значение относительной погрешности (5) и записать доверительный интервал для сопротивления по формуле (6).

Задание 2

Предыдущий метод определения точности проведённых экспертных оценок и доверительного интервала для них можно применять при проведении прямых или непосредственных измерений, но он неточен, так как используются средние арифметические значения исследуемого признака и средние отклонения всех остальных - случайных значений экспертных оценок от него, которые являются лишь первыми приближениями к истинному значению.

Более точным методом определения доверительного интервала является метод среднего квадратичного отклонения - дисперсии S^2 случайных значений, полученных при неоднократных измерениях каждым независимым экспертом от среднего значения всех измерений, определённого одним экспертом или всеми экспертами.

Метод среднего квадратичного отклонения позволяет задаваться вероятностью того, что результат численного определения экспертной оценки признака или состояния исследуемого объекта отличается от истинного значения исследуемого параметра на величину, не большую чем a , называемой доверительной вероятностью или коэффициентом надёжности. В теории вероятности эту величину определяют выражением

$$\alpha = \rho([\langle x \rangle - \langle \Delta x \rangle] < X_{\text{ист}} < [\langle x \rangle + \langle \Delta x \rangle]),$$

которое означает, что с вероятностью α результат проведения экспертных оценок не выходит за пределы доверительного интервала, величина которого определяется с помощью коэффициента Стьюдента t по формуле

$$\langle \Delta x \rangle = \sigma \cdot t,$$

Значение t зависит от числа независимых экспертов или числа производимых измерений одним экспертом, когда $3 \leq t < 20$.

В приведенном фрагменте таблицы Стьюдента показано только нечётное число экспериментов, сделанных одним экспертом, и нечётное число экспертов, необходимых для создания представительной ($3 \leq k \leq 19$) или генеральной выборки ($3 \leq k \leq 19$) - совокупности численных значений экспертных оценок того или иного признака. Точность определения численного значения экспертных оценок выражается величиной относительной погрешности, которая рассчитывается по формуле (5).

Таблица 1. Фрагмент таблицы Стьюдента

Число опытов -Экспертов	Доверительная вероятность α						
	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
3	t= 1,3	t= 1,9	t= 2,9	t=4,3	t= 7,0	t= 9,9	t= 31,6
5	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,6
7	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
9	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
11	1,1	1,4	1,8	2,2	2,8	3,4	4,6
13	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,3
15	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	3,0	4,1
17	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	4,0
19	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	3,9

Рассмотрим метод - алгоритм статистической обработки ряда измерений одного измеримого признака, то есть одного параметра - сопротивления резистора:

1. *Создать исходную базу данных*, которая представляет собой некоторую последовательность значений сопротивления, полученных всеми экспертами-студентами.

2. *Определить размах R численных данных*, который определяется разностью максимального и минимального значений, полученных всеми экспертами.

$$R = R_{\max} - R_{\min}$$

3. *Определить число интервалов k* , которое по рекомендации Брукса и Каррузера зависит от числа экспертов или измерений N по формуле

$$k = 5 \cdot \lg(N),$$

для студенческой группы, в которой $N = 30$: $k = 5 \cdot \lg(30) = 7,39 \approx 7$.

4. *Определить ширину интервала* для распределения - классификации численных значений всей базы данных по интервалам шириной $d = \langle \Delta p \rangle$ - как наибольший из доверительных интервалов всех экспертных оценок или путем деления размаха численных значений R на число интервалов k .

5. *Заполнить таблицу 2 для первичной статистической обработки численных значений экспертных оценок.*

Таблица 2. Таблица первичной статистической обработки

№	Границы интервала а	Абсолютная частота, m	Номер интервала, h	$m \cdot h$	$m \cdot h^2$	Относительная частота, %	Функция Гаусса - формула (2)
1	2	3	4	5	6	7	
1	-						
2	-						
3	-						
4	-						
5	-						
6	-						
7	-						
8	-						
		$\sum m = ?$		$P = \sum(m \cdot h)$	$Q = \sum(m \cdot h^2)$	100	

6. После заполнения таблицы 2 и первичной обработки численных значений экспертных оценок определить статистические характеристики распределения непрерывного ряда случайных значений сопротивления резистора:

- Интервалу с наибольшей абсолютной частотой (столбец 3) присваиваем номер h (столбец 4) равный 0. Интервалу, предшествующему данному интервалу, присваивается индекс -1, далее интервалам, которые еще меньше присваиваются индексы -2,-3,-4 и т.д. Интервалу, последующему за наиболее вероятным интервалом, присваивается индекс 1, далее интервалам, которые еще больше присваиваются индексы 2, 3, 4 и т.д.

- *вспомогательное среднее значение экспертных оценок*, соответствующее середине интервала в таблице 1, на который приходится максимальное число повторений - максимальная абсолютная частота m : $\langle x \rangle = ?$;

- Количество измерений: $\sum m = ?$;

- Вспомогательные статистические характеристики распределения случайных значений: $P = \sum(m \cdot h) = ?$ (должна браться со своим знаком "+" или "-") и $Q = \sum(m \cdot h^2) = ?$

7. Определить *математическое ожидание* - моду истинного значения случайной величины M_x , наиболее часто встречающуюся к базе данных величину по формуле

$$M_R = \langle x \rangle \pm P \cdot \frac{d}{N}$$

8. Определить дисперсию распределения случайных значений экспертных оценок по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{d^2}{(N-1)} \cdot \left[Q - \frac{P^2}{N} \right]$$

9. Определить стандартное отклонение S математического ожидания от истинного значения экспертных оценок по формуле:

10. Определить коэффициент вариации V по формуле:

$$V = \pm \frac{S}{M_R}$$

11. Определить доверительный интервал $\langle \Delta R \rangle$ математического ожидания истинного значения со статистической достоверностью α , через коэффициент Стьюдента t из таблицы 3:

$$\langle \Delta R \rangle = \pm \sigma \cdot t$$

Таблица 3 Фрагмент таблицы Стьюдента

Для	N	25	30	50	75	100	>100
$\alpha = 0,95$	t	2,06	2,05	2,1	1,99	1,96	1,96

12. Записать окончательный результат статистической обработки экспертных оценок в виде:

$$R_{\text{ист}} \in [M_R \pm \langle \Delta R \rangle]$$

Задание 3

Ознакомиться с правилами графического представления распределении частот - вероятностей непрерывной случайной величины.

1. *Гистограмма распределения.* Если в прямоугольных координатах отложить по оси абсцисс границы интервалов от минимального значения R_{\min} до максимального значения R_{\max} , а по оси ординат соответствующие частоты, и построить для каждого интервала прямоугольник шириной d и высотой m или $m/N \cdot (100\%)$ (после выбора соответствующего масштаба по оси ординат), то получится ступенчатый многоугольник, называемый гистограммой (рисунок 1).

2. *Гистограмма распределения.* Если в прямоугольных координатах отложить по оси абсцисс границы интервалов от минимального значения R_{\min} до максимального значения R_{\max} , а по оси ординат соответствующие частоты, и построить для каждого интервала прямоугольник шириной d и высотой m или $m/N \cdot (100\%)$ (после выбора соответствующего масштаба по оси ординат), то получится ступенчатый многоугольник, называемый гистограммой (рисунок 1).

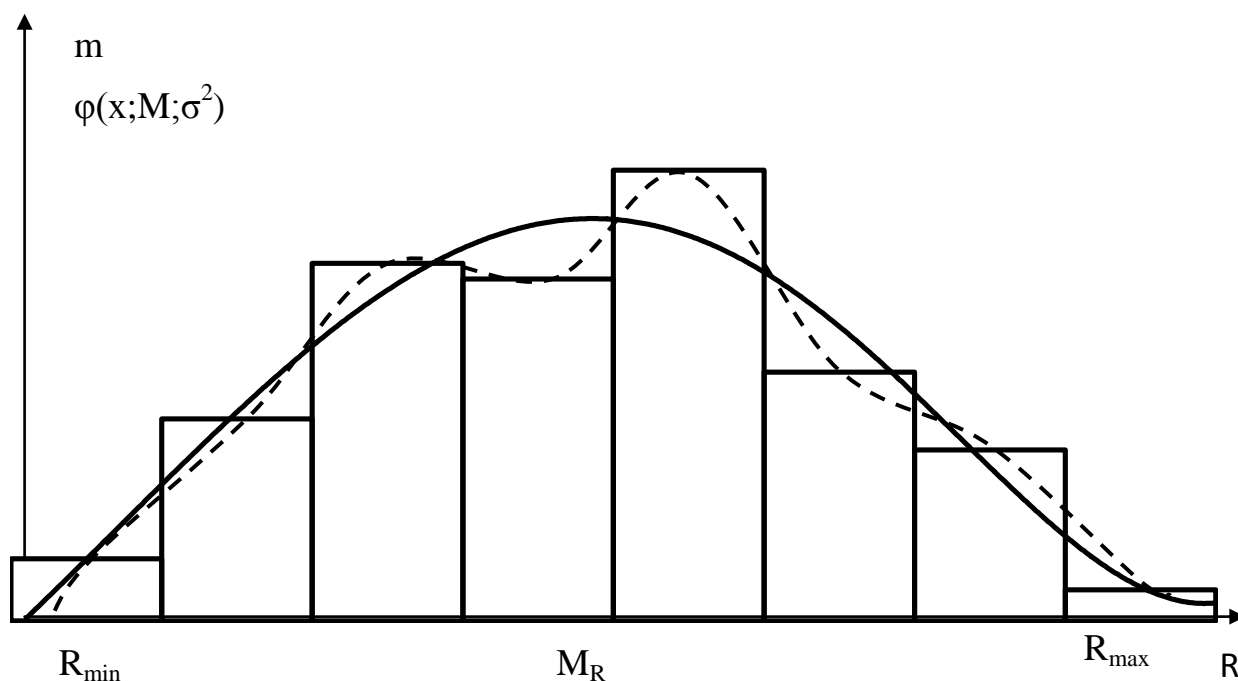


Рисунок. 2 - Возможные варианты графического представления характеристик распределения непрерывного ряда случайных значений числовых значений экспертных оценок сопротивления резисторов.

3. *Гистограмма распределения.* Если в прямоугольных координатах отложить по оси абсцисс границы интервалов от минимального значения R_{\min} до максимального значения R_{\max} , а по оси ординат соответствующие частоты, и построить для каждого интервала прямоугольник шириной d и высотой m или $m/N \cdot (100\%)$ (после выбора соответствующего масштаба по оси ординат), то получится ступенчатый многоугольник, называемый гистограммой (рисунок 1).

4. *Полигон частот.* Другое представление получается, если в серединах интервалов на оси абсцисс восстановить перпендикуляры высотой m или $m/N \cdot (100\%)$ и соединить между собой их вершины, в результате получаем полигон частот или эмпирическую кривую распределения.

На рисунке 2 представлены полигон частот, как набор вертикальных жирных линии; эмпирическая кривая распределения, представленная штриховой ломаной кривой и гистограмма частот распределения непрерывного ряда случайных численных значений экспертных оценок, как набор вертикальных прямоугольников ширина которых равна ширине интервалов таблицы 1, а высота равна абсолютным частотам m . Все типы графического представления показаны на фоне Гауссовой кривой.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Укажите в какой ситуации возможно появление случайной ошибки при прямом определении экспертной оценки.
2. Укажите международную единицу измерения сопротивления (система СИ).
3. Какая величина при прямых измерениях окажется лучшим приближением к истинному значению физической величины?
4. Укажите смысл доверительного интервала физической величины.
5. Какая величина определяет точность проведенных измерений?
6. К каким ошибкам приводит неправильная установка прибора, неполная разработка метода измерений, неучет всех факторов, которые влияют на точность прибора?
7. К каким ошибкам приводит небрежность экспериментатора в работе ?
8. К каким ошибкам приводит изменение внешних условий?
9. Напишите формулу определения размаха R случайных значений экспертных оценок для статистического анализа.
10. Напишите формулу определения числа интервалов k для статистического анализа файла данных из N случайных значений
11. Напишите формулу определения ширины интервала d для статистического анализа файла из N случайных численных значений.
12. Напишите формулу определения математического ожидания истинного значения из N анализируемых случайных численных значений.
13. Напишите формулу определения дисперсии σ^2 для характеристики распределения численных значений по интервалам d экспертных оценок.
14. Напишите формулу для определения стандартного отклонения S математического ожидания от истинного значения экспертной оценки.
15. Напишите формулу для определения коэффициента вариация V распределения экспертных оценок относительно математического ожидания истинного значения экспертных оценок.
16. Напишите формулы закона Ома для замкнутой цепи и для участка цепи.
17. Получите формулу для расчета сопротивления участка цепи при параллельном и последовательном соединении резисторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 2. - СПб.: "Лань", 2007 г., 480 с.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учебн. пособие: Для вузов. В 5 т. - М.:Физматлит, 2005. – 560 с.
3. Физика. Электростатика. Постоянный ток.: Конспект лекций/ В. М. Полунин, Г. Т. Сычёв. Курск. Гос. Техн. Ун-т. Курск, 2003. 185с.

Изучение современного цифрового осциллографа

Цель работы: освоение методов измерения параметров электрических сигналов с помощью современного цифрового осциллографа, оценка погрешностей измерения электрических величин.

Приборы и принадлежности: осциллограф цифровой запоминающий GDS-72072 E, генератор AFG-72225 - генератор сигналов специальной формы.

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Устройство электронного осциллографа

Электронный осциллограф — прибор, предназначенный для исследования быстропротекающих процессов в электрических цепях.

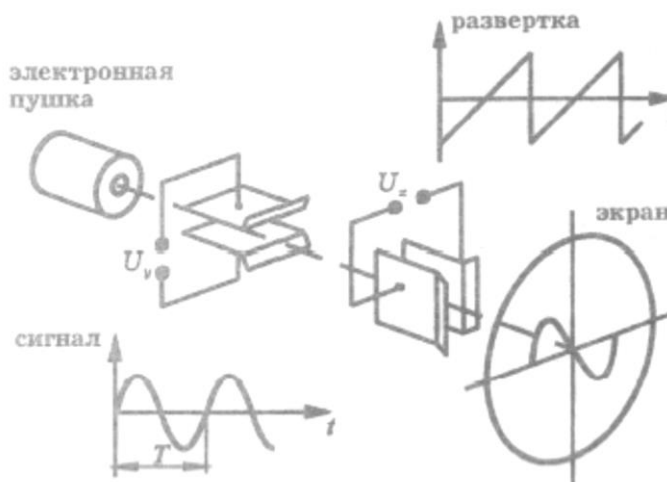


Рисунок 1 - Схема получения изображения временной зависимости $y = f(t)$

На экране электроннолучевой трубки осциллографа можно получить графическое изображение зависимостей двух видов: временных $y = f(t)$ и функциональных $y = f(x)$. В первом случае функциональное отклонение луча осуществляется с постоянной скоростью, для чего на пластины X от внутреннего генератора развертки подается напряжение, увеличивающееся строго пропорционально времени t (пилообразное напряжение) (рис.1). Во втором случае развертка по горизонтали осуществляется напряжением сигнала, пропорционального какой-либо величине x . Основные узлы осциллографа приведены на рис.2.

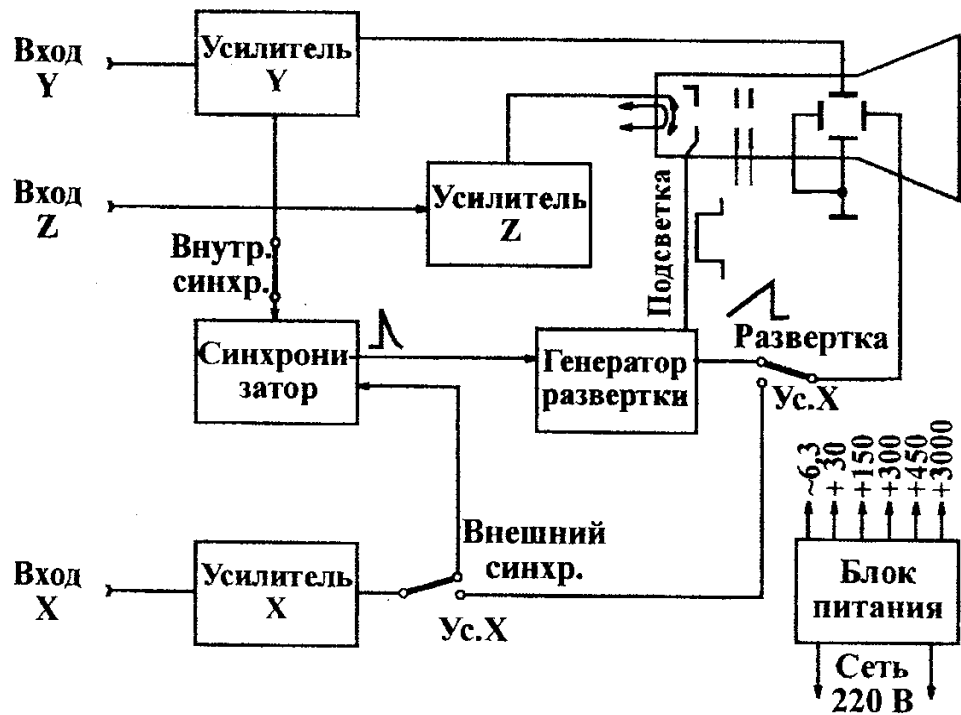


Рисунок 2 - Блок-схема осциллографа

Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ)

По принципу отклонения и фокусировки электронного луча различают два вида ЭЛТ: электростатические и магнитные. На рис.3 показано устройство электростатической трубки. Внутри стеклянного баллона, откачанного до давления 10^{-4} Па, помещается ряд электродов. Источником электронов служит оксидный подогревный катод К, окруженный цилиндром М с маленьким отверстием в центре. Этот электрод называется управляющим, или модулятором. Регулируя отрицательный потенциал этого электрода, можно менять ток пучка и, соответственно, яркость изображения.

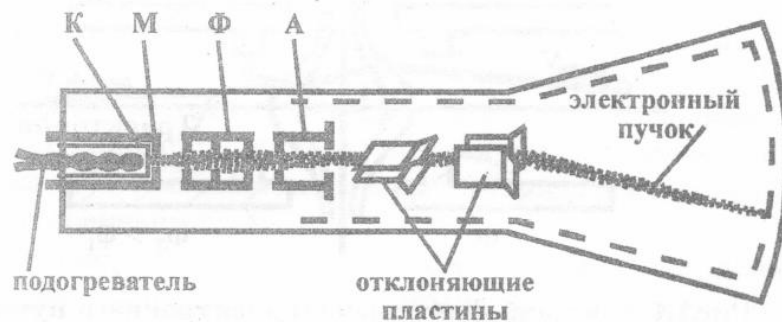


Рисунок 3 - Устройство электростатической трубки

Электроны, прошедшие отверстие в управляющем электроде, ускоряются электрическим полем фокусирующего электрода Ф (первого анода), так как он

имеет положительный потенциал относительно катода. Пройдя ограничивающие диафрагмы фокусирующего электрода, пучок ускоряется вторым анодом А, на который подается положительное напряжение порядка 1000 В.

Проходя в зазорах между электродами, где сосредоточено электростатическое поле, электроны пучка помимо ускорения испытывают радиальное смещение и отклоняются к оси. Действие таких электрических полей похоже на действие оптических линз. Это помогает понять рис.4.

Влетая слева в зазор между электродами Ф и А, электрон отклоняется полем сначала вниз, а затем вверх от горизонтальной оси, т.е. слева поле действует как собирающая поверхность линзы, а справа - как рассеивающая. Одновременно электрон ускоряется электрическим полем и его осевая скорость справа v_2 становится больше скорости слева v_1 . Поле сильнее искривляет траекторию медленного электрона, чем более быстрого. Поэтому собирающее действие электронной линзы преобладает над ее рассеивающим действием, в результате чего линза отклоняет электроны пучка к оси, т.е. всегда является собирающей.

Меняя потенциал одного из электродов, например потенциал электрода Ф (ручка («ФОКУС»)), можно легко регулировать преломляющую силу электронной линзы и фокусировать пучок на экране трубки.

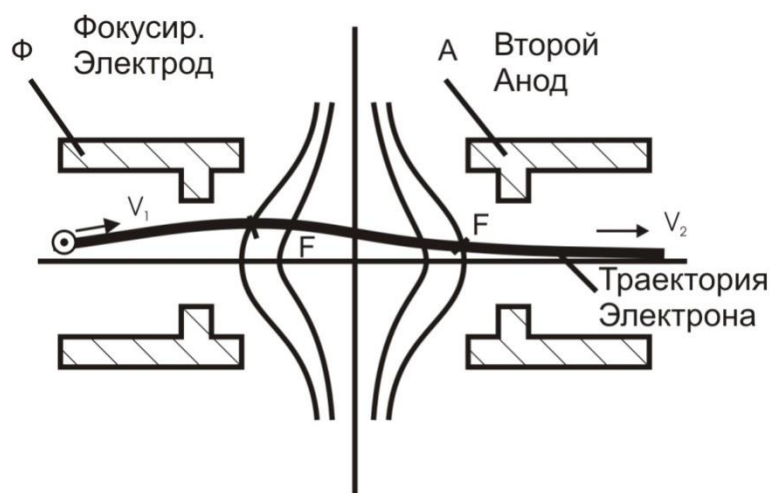


Рисунок 4 - Принцип фокусировки электронного пучка.

Выйдя из второго анода, электронный луч проходит между двумя парами пластин, которые отклоняют его в двух взаимно перпендикулярных направлениях X и Y. Величина смещения пятна на флуоресцирующем экране пропорциональна приложенному к пластинам напряжению. Убедиться в том, что это именно так, можно, решив задачу отклонения пучка полем в плоском конденсаторе (см.раздел «Чувствительность прибора»).

Усилители сигналов

Напряжение, требуемое для полного вертикального отклонения электронного пучка вдоль экрана (без усиления) составило бы 200...300 В. Чтобы получить заметное отклонение луча для очень малых сигналов: $\sim 0,01$ В, необходимо иметь дополнительное усиление в десятки тысяч раз. Усилитель канала «Х» имеет обычно меньший коэффициент усиления — 100...1000. Усилители каналов «У» имеют калиброванные ступенчатые и плавные регуляторы коэффициентов усиления.

Генератор развертки

Как уже упоминалось выше, для того, чтобы на экране осциллографа можно было увидеть как в каком-либо физическом процессе некоторая величина y изменяется в зависимости от поведения другой величины x ($y=f(x)$), необходимо на горизонтально отклоняющие пластины подать напряжение U_x , пропорциональное величине x , а на вертикально отклоняющие пластины одновременно подать напряжение U_y , пропорциональное величине y . Тогда электронный луч на экране начертит кривую, соответствующую зависимости $y=f(x)$. Если заставить луч многократно повторять свой путь по экрану, то вследствие инерционности глаза наблюдатель увидит неподвижный график зависимости $y=f(x)$.

На практике часто приходится наблюдать изменение различных физических величин от времени, т.е. функции вида $y=f(t)$. При этом на вертикально отклоняющие пластины необходимо подать напряжение, пропорциональное исследуемой величине y , а на горизонтально отклоняющие пластины — напряжение, изменяющееся линейно со временем t .

Напряжение, величина которого меняется пропорционально времени, называется «пилообразным» напряжением и вырабатывается в осциллографе специальным «генератором развертки» (рис.2, 5).

Частоту развертки можно регулировать, что позволяет менять скорость горизонтального перемещения луча и исследовать сигналы разной длительности.

Генератор одновременно вырабатывает импульс подсветки луча во время прямого хода. Действие этого модулирующего импульса прекращается в конце периода развертки, поэтому обратный ход луча на экране не виден. Генератор может работать в непрерывном автоколебательном режиме при исследовании непрерывных периодических процессов и в ждущем режиме при исследовании прерывистых процессов. В последнем случае напряжение развертки вырабатывается только с приходом на вход осциллографа исследуемого импульсного сигнала. Следующий цикл развертки может начаться лишь с поступлением следующего запускающего импульса.

Синхронизатор

Для получения на экране трубки четкой картины необходимо, чтобы все периодически возникающие изображения накладывались одно на другое. Это условие обеспечивается блоком синхронизации (Рис.2).

В режиме внутренней синхронизации запуск развертки принудительно начинается с приходом сигнала в момент времени, когда напряжение сигнала достигает некоторого порога. Блок синхронизации вырабатывает короткий импульс, заставляющий сработать генератор и выработать пилообразное напряжение. Это позволяет каждый раз с приходом сигнала как бы совмещать нуль оси времени, что и требуется (Рис.5).

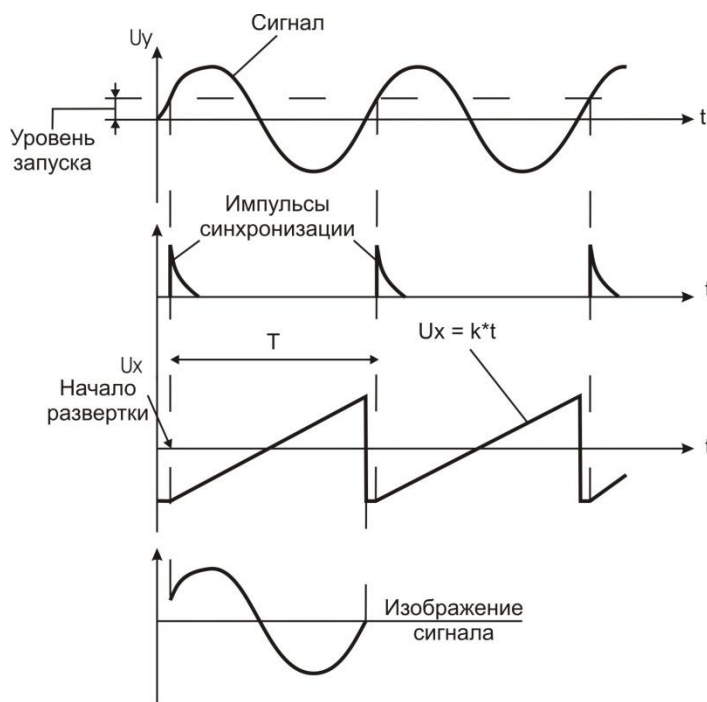


Рисунок 5 – Синхронизация генератора развертки исследуемым сигналом

При необходимости сравнения длительности различных процессов, измерениях фазы и т.п. за нуль оси времени можно выбрать момент появления другого сигнала, который и будет запускать генератор в режиме внешней синхронизации. Регулировка порога срабатывания синхронизатора обеспечивается ручкой «Уровень запуска».

Калибраторы

Для градуировки вертикальной оси «У» в единицах напряжения осциллограф снабжен специальным встроенным генератором, вырабатывающим напряжение известной амплитуды. Для градуировки горизонтальной оси времени используется эталонный синусоидальный генератор известной частоты, т.е. с известным периодом.

Канал « Z »

В современных осциллографах имеется еще один канал, используемый для модуляции внешним сигналом интенсивности пучка и, соответственно, яркости. Усиленное напряжение сигнала прикладывается между катодом и управляющим электродом трубки. Вход этого канала обозначается на панели «Z - ось».

Блок питания вырабатывает необходимые напряжения для питания трубки, ламп и транзисторов.

Чувствительность прибора

Как уже сказано выше, на пути к экрану электронный пучок проходит между двумя парами отклоняющих пластин. Разность потенциалов U , приложенная к пластинам, создает между ними электрическое поле напряженностью E , которое отклоняет электронный луч и перемещает светящееся пятно по экрану.

Горизонтально расположенные пластины отклоняют луч по вертикали (вдоль оси y), а вертикально расположенные — по горизонтали (вдоль оси x). Установим связь между напряжением на вертикально отклоняющих пластинах U и величиной смещения L_y на экране (см.рис.6).

Электрон с массой m влетает в однородное электрическое поле со скоростью $u_0 = u_z$. Вдоль оси z на электрон не действуют никакие силы (движение по инерции), поэтому в направлении z он движется равномерно:

$$z = v_0 \cdot t \quad (1)$$

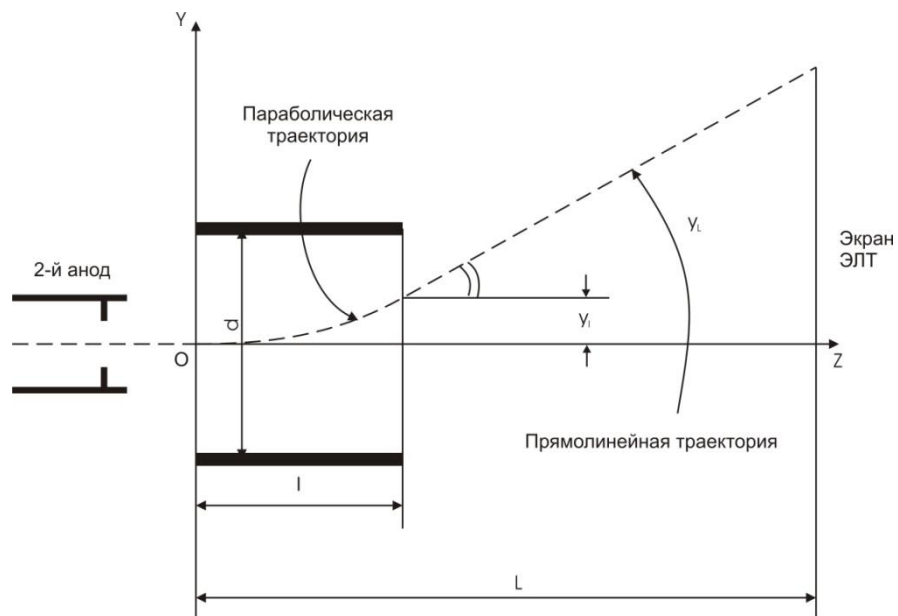


Рисунок 6 - Два участка траектории электрона на пути к экрану.

В зазоре вертикально отклоняющих пластин на электрон действует кулоновская сила

$$\vec{F} = e * \vec{E} \quad (2)$$

Так как $\vec{F} = \text{const}$, движение электрона вдоль оси y на участке длиной l будет равноускоренным (рис.6):

$$v_y = a \cdot t, \quad y = a \cdot \frac{t^2}{2} \quad (3)$$

Величину ускорения a найдем из второго закона Ньютона:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{e \cdot E}{m}, \quad a = \frac{e \cdot E}{m \cdot d} \quad (4)$$

где d — расстояние между пластинами.

Так как $E = U/d$, то смещение электрона вдоль оси y равно

$$y = \frac{E \cdot U \cdot t^2}{2m \cdot d} \quad (5)$$

Учитывая, что время пролета электроном участка длиной l равно $t = l/u_0$, для смещения y_l в конце пластин получаем

$$y_l = \frac{E \cdot U \cdot l^2}{2m \cdot d \cdot v_0^2} \quad (6)$$

Из этой формулы видно, что траектория электрона на участке 1 между пластинами представляет собой параболу. Сразу же при выходе из пространства между отклоняющими пластинами электрон сместится относительно первоначального направления движения на некоторый угол α (см.рис.6), который определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_0} = \frac{a \cdot t}{v_0} = \frac{E \cdot U \cdot l^2}{m \cdot d \cdot v_0^2} \quad (7)$$

Зная $\operatorname{tg} \alpha$, найдем смещение светящегося пятна на экране:

$$y_L = y_l + (L - l) \operatorname{tg} \alpha = \frac{E \cdot U \cdot l \cdot (2L - l)}{2m \cdot d \cdot v_0^2} \quad (8)$$

или, поскольку расстояние l много меньше L

$$y_L = \frac{E \cdot l \cdot L}{m \cdot d \cdot v_0^2} \quad (9)$$

Итак, смещение луча на экране пропорционально напряжению на отклоняющих пластинах.

Отклонение пятна на экране (в миллиметрах) δ_y , вызванное напряжением в один вольт на отклоняющих пластинах, называется чувствительностью трубки:

$$\delta_y = \frac{y_L}{U} = \frac{E \cdot l \cdot L}{m \cdot d \cdot v_0^2} \quad (10)$$

Если U_0 — потенциал второго анода А относительно катода К (рис.3), то кинетическая энергия электрона определяется из уравнения

$$\frac{m \cdot v_0^2}{2} = e \cdot U_0 \quad (11)$$

откуда имеем

$$v_0^2 = \frac{2 \cdot e \cdot U_0}{m} \quad (12)$$

Тогда чувствительность электронной трубки равна

$$\delta_y = \frac{l \cdot L}{2 \cdot d \cdot U_0} \quad (13)$$

и зависит от расстояния между пластинами d , от расстояния до экрана L , а также от ускоряющего напряжения U_0 между вторым анодом А и катодом К.

Параметры электрических сигналов

Зависимость мгновенного значения напряжения от времени $U(t)$ может использоваться для передачи информации и поэтому называется электрическим сигналом. В настоящее время с помощью цифровых методов можно получить электрический сигнал любой формы. В данной работе изучаются две формы электрических сигналов: синусоидальная (рис. 7) и прямоугольная (рис. 8).

Сигналы синусоидальной и прямоугольной формы являются периодическими функциями времени. Функция $f(x)$ называется периодической, если существует такое число $T > 0$ (период), что на всей области определения функции выполняется равенство $f(x) = f(x + T)$. Применительно к электрическому сигналу, периодом T называется наименьший интервал времени, через который повторяется мгновенное значение напряжения $U(t)$ для любого момента времени t (рис. 7 и рис. 8).

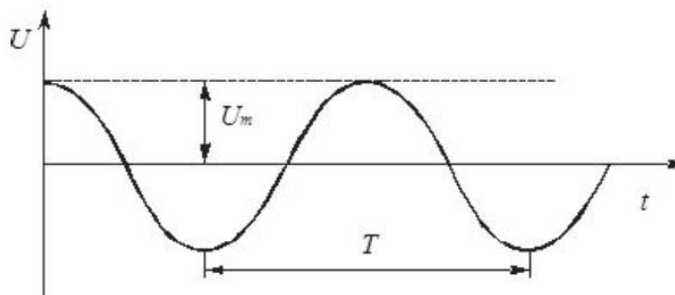


Рисунок 7 - Сигнал синусоидальной формы:
 T — период, U_m — амплитуда сигнала

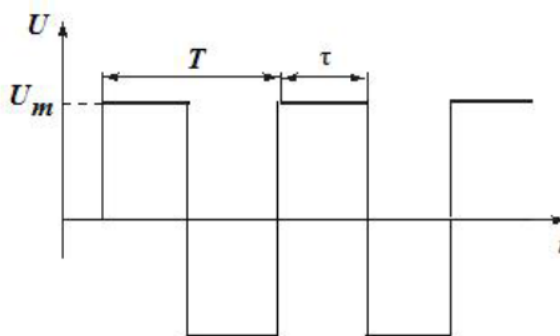


Рисунок 8 - Сигнал прямоугольной формы:
 T — период, τ — длительность, U_m — амплитуда сигнала

Сигнал синусоидальной формы (переменное напряжение) описывается уравнением гармонических колебаний

$$U = U_m \cos(\omega t + \phi),$$

где U_m — амплитудное значение напряжения (амплитуда); t — время; ω — циклическая частота; $(\omega t + \phi)$ — фаза колебаний; ϕ — начальная фаза.

Частота колебаний ν — величина, обратная периоду колебаний:

$$\nu = T^{-1}.$$

Циклическая частота ω — величина, равная произведению частоты колебаний на 2π :

$$\omega = 2\pi \nu.$$

Измерение переменного напряжения электроизмерительными приборами дает действующее значение U_d , которое связано с амплитудным значением синусоидального сигнала:

$$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Амплитудное значение напряжения может быть измерено с помощью электронного осциллографа.

Форма реального прямоугольного сигнала отличается от идеального прямоугольника. Обычно в электронной схеме время нарастания сигнала t_n составляет от нескольких наносекунд до нескольких микросекунд. Сигнал прямоугольной формы (рис. 8.) характеризуется амплитудой U_m , периодом T , длительностью τ , а также скважностью — отношением периода следования к длительности импульсов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Цифровой осциллограф объединяет в себе возможности осциллографа аналогового вида и ЭВМ. Он не только может отображать показания изменяющегося напряжения в реальном времени, но и позволяет выполнить запись сигналов в свою память. В отличие от аналогового, цифровой осциллограф может показать «предварительный запуск», то есть просмотр предыстории сигнала до появления запуска исследуемого импульса. В цифровых осциллографах аналоговый исследуемый сигнал сразу же во входном блоке преобразуется в цифровую форму и запоминается в дискретной памяти. Зафиксированный в памяти сигнал может быть использован для отображения его на плоском матричном экране или любым другим способом.

Наряду с повышением точности регистрации сигнала, цифровые осциллографы позволяют полностью автоматизировать процесс измерения, осуществлять дистанционное управление режимом работы, производить математическую и логическую обработку информации.

Использование матричных экранов снижает габариты и массу цифровых осциллографов и устраняет необходимость применения источников питания высокого напряжения.

В используемом в лаборатории цифровом осциллографе типа GDS-72072E (рис. 9) отображающее устройство представляет собой цветной жидкокристаллический экран диаг. 20см, 8×10 дел (разрешение 800х600).

В блок управления осциллографом включаются арифметическологические устройства, что намного расширяет функциональные возможности цифрового осциллографа. Становится возможным оцифровывать любые значения исследуемого сигнала, получать и отображать его производную, интеграл, спектральную характеристику, корреляционную функцию, распределение плотности вероятности и т.д.



ЭЛЕКТРОПРИБОР

Рисунок 9 - Внешний вид осциллографа цифрового запоминающего GDS-72072 E

Основные технические характеристики цифрового осциллографа типа GDS-72072E представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Основные технические характеристики цифрового осциллографа типа GDS-72072E

Полоса пропускания, МГц	Коэффициент отклонения повертикали (Коткл)	Погрешность установки Коткл	Коэффициент Развертки (Кразв)	Погрешность установки Кразв	Количество каналов
0-70	1 мВ/дел...10 В/дел	±5% при Коткл 1 мВ/дел ±3% при Коткл ≥2 мВ/дел	1 нс/дел...100 с/дел	± 0,002 %	2

Дополнительные характеристики цифрового осциллографа типа GDS-72072E: Встроенный flash-диск 64 мБ; режим автовыбора диапазона регулировки (Коткл, Кразв); память — 24 осциллограммы, 20 профилей.

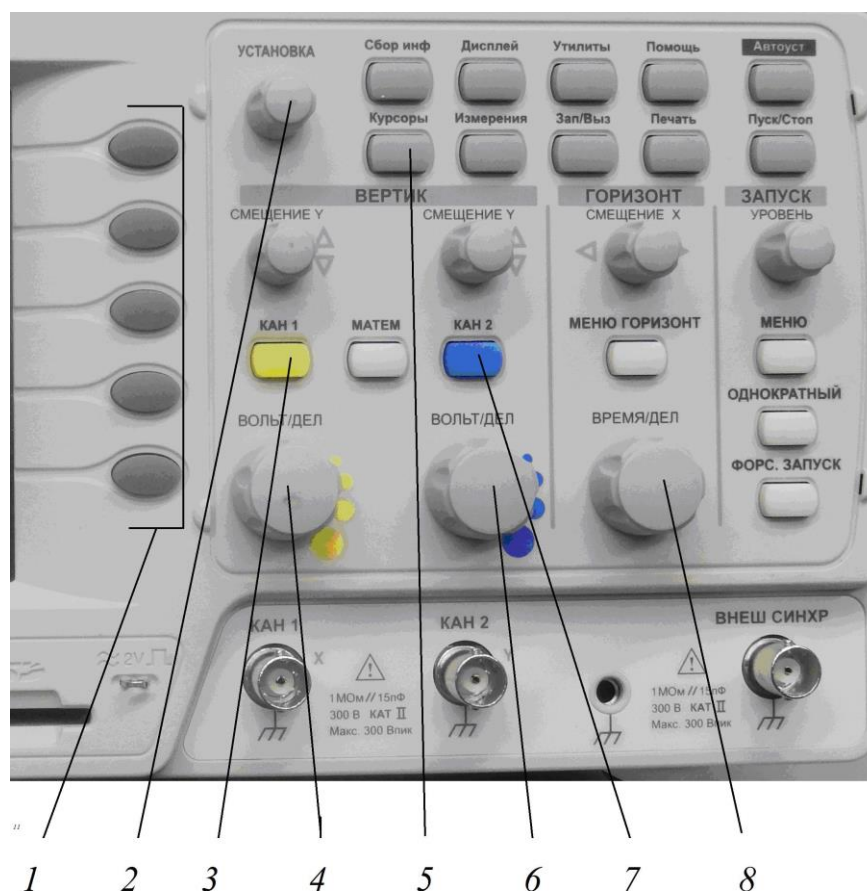


Рисунок 10 - Панель управления осциллографом цифровым типа GDS-72072E:

1 — функциональные кнопки; 2 — рукоятка «УСТАНОВКА» перемещения курсоров по экрану осциллографа; 3, 7 — кнопки включения входных каналов; 4, 6 — переключатели ВОЛЬТ/ДЕЛ коэффициента отклонения по вертикали; 5 — кнопка КУРСОРЫ; 8 — переключатель ВРЕМЯ/ДЕЛ коэффициента развертки

На экране осциллографа, помимо собственно осциллограмм, отображается состояние органов управления (чувствительность, длительность развертки и т.п.). Предусмотрен вывод информации с осциллографа на печать и другие функциональные возможности.

Наблюдение периодических сигналов на экране цифрового осциллографа

1. С помощью коаксиального кабеля подключите один из двух входных каналов цифрового осциллографа к выходу генератора сигналов специальной формы AFG-72225.

2. Нажатием кнопок в нижнем левом углу лицевых панелей включите генератор и цифровой осциллограф.

3. Нажмите кнопку с изображением синусоидального сигнала (\sim) в нижнем ряду кнопок на панели генератора.

4. Нажатием кнопки с надписью 1К в верхнем ряду кнопок на лицевой панели генератора AFG-72225 включите множитель частоты 1000 и вращением рукоятки с надписью FREQUENCY установите частоту колебаний, указанную преподавателем. Вращением рукоятки с надписью AMPL установите указанную преподавателем амплитуду колебаний.

5. На панели цифрового осциллографа (рис. 10) нажмите кнопку 3 (либо 7) управления каналами в соответствии с номером канала, к которому подключен кабель генератора (подробное описание расположения кнопок на панели осциллографа представлено в указаниях на стенде).

6. Вращением рукоятки переключателя ВОЛЬТ/ДЕЛ 4 (6) (рис. 10) добейтесь, чтобы изображение синусоидального сигнала заняло, практически, всю площадь экрана дисплея.

7. Вращением рукоятки переключателя 4 (8) ВРЕМЯ/ДЕЛ установите такое значение коэффициента развертки, при котором на экране наблюдается 2—3 периода синусоидального сигнала.

8. Цифровой осциллограф обеспечивает возможность различных измерений с помощью курсоров — светящихся вертикальных и горизонтальных линий, которые появляются на экране при нажатии кнопки 5 «Курсоры» на панели осциллографа (рис. 9). С помощью вертикальных курсоров возможно измерение временных параметров. С помощью горизонтальных курсоров возможно измерение амплитудных параметров сигнала.

9. Справа от экрана на одной вертикали расположены пять функциональных кнопок 1 управления меню экрана. После нажатия кнопки 5 «Курсоры», нажимая верхнюю функциональную кнопку F1, выберите номер канала 1 или 2. Нажимая и отпуская нижнюю функциональную кнопку F5, выберите горизонтальные (X) или вертикальные (Y) курсоры.

10. В поле управления курсорами установите активный для управления курсор (нажатием соответствующей функциональной кнопки 1) и вращением регулятора 2 «УСТАНОВКА» установите активный курсор в необходимую позицию. В поле отображения результата измерения будет присутствовать значение напряжения, соответствующее положению горизонтального курсора, или значение времени для вертикальных курсоров.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерьте амплитуду U_m и период T синусоидальных колебаний: — проверьте соединение, а в случае его отсутствия соедините коаксиальным кабелем выход генератора сигналов специальной формы с одним из двух входных каналов на лицевой панели осциллографа;

— нажмите кнопку \sim (СИНУСОИДАЛЬНЫЙ СИГНАЛ) на панели генератора сигналов специальной формы;

— включите тумблеры СЕТЬ лабораторного стенда, осциллографа, генератора и вольтметра;

— установите на генераторе значения частоты и выходного напряжения синусоидального сигнала, указанные преподавателем;

— когда на экране осциллографа появится изображение синусоидального сигнала, выполните следующие операции:

- с помощью регулировки яркости и фокусировки получите тонкую и достаточно яркую линию;

- ручками перемещения луча по горизонтали и вертикали выведите изображение сигнала в центр экрана;

- ручкой регулировки уровня синхронизации (LEVEL) добейтесь устойчивого изображения (синхронизация — внутренняя);

- регулировкой усиления по вертикали добейтесь, чтобы изображение занимало практически весь экран;

- подберите значение коэффициента развертки по горизонтали, при котором на экране наблюдается 2—3 периода синусоидальных колебаний;

— измерьте по шкале (в делениях шкалы) на экране осциллографа амплитуду H синусоидального сигнала. Результат измерения и коэффициент отклонения по вертикали Y_m в единицах «В/дел» запишите в табл. 2;

— измерьте по шкале на экране осциллографа число делений L , соответствующих целому числу n периодов. Результаты измерений и значение коэффициента развертки по горизонтали X_m в единицах время/дел запишите в табл. 2.

3. Измерьте параметры импульсного сигнала:

— нажмите кнопку \square (ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ ИМПУЛЬСЫ) на панели генератора сигналов;

— получите устойчивое изображение прямоугольного сигнала на экране осциллографа;

— измерьте по шкале на экране осциллографа амплитуду сигнала H , его длительность L_1 и период следования L_2 . Результаты измерений, значение коэффициента отклонения по вертикали Y_m в единицах

В/дел и коэффициента развертки по горизонтали X_m в единицах время/дел запишите в табл. 3.

Таблица 2 - Измерение амплитуды и периода синусоидального сигнала

Установлено	Измерено осциллографом			
$U_d, В$	$H, дел$	$Y_m, В/дел$	$U_m, В$	$U_d, В$
$\nu, Гц$	$L, дел$	$X_m, мс/дел$	$T, мс$	$\nu, Гц$

Таблица 3 - Измерение амплитуды, длительности и периода импульсного сигнала

$H, дел$	$Y, В/дел$	$U, В$
$L1, дел$	$X, мс/дел$	$\tau, мс$
$L2, дел$	$X, мс/дел$	$T, мс$

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Используя данные, приведенные в табл. 2, рассчитайте амплитуду синусоидального сигнала по формуле

$$U_m = H Y_m.$$

2. Вычислите значение действующего напряжения синусоидального сигнала по формуле

$$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

3. Рассчитайте период колебаний по формуле

$$T = L X_m.$$

4. Рассчитайте частоту колебаний по формуле

$$\nu = 1 / T.$$

5. По данным, приведенным в табл. 3, рассчитайте амплитуду, длительность, период и частоту следования сигнала прямоугольной формы.

6. Рассчитайте погрешности измерений, запишите результат в стандартном виде.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Что называется амплитудой гармонических колебаний?
2. Что характеризует фаза колебаний?
3. Как с помощью осциллографа измеряется амплитуда и длительность электрического сигнала?
4. Какие параметры синусоидального сигнала можно измерить с помощью вольтметра?
5. В каком соотношении находится действующее и амплитудное значение синусоидального сигнала?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 2. - СПб.: "Лань", 2007 г., 480 с.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учебн. пособие: Для вузов. В 5 т. - М.:Физматлит, 2005. – 560 с.
3. Физика. Электростатика. Постоянный ток.: Конспект лекций/ В. М. Полунин, Г. Т. Сычёв. Курск. Гос. Техн. Ун-т. Курск, 2003. 185с.

Измерение параметров электрических цепей

Цель работы: изучить схему соединения резисторов, выполнить необходимые расчеты и измерения для определения расстояния до места повреждения изоляции витой пары.

Приборы и принадлежности: установка с четырьмя промаркированными выводами, образец проводника, мультиметр FLUKE-15b, микрометр.

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Электрическое сопротивление проводника

Электрическое сопротивление проводника:

- 1) величина, характеризующая противодействие проводника или электрической цепи электрическому току;
- 2) структурный элемент электрической цепи, включаемый в цепь для ограничения или регулирования силы тока.

Электрическое сопротивление металлов зависит от материала проводника, его длины и поперечного сечения, температуры и состояния проводника (давления, механических сил растяжения и сжатия, т.е. внешних факторов, влияющих на кристаллическое строение металлических проводников).

Зависимость сопротивления от материала, длины и площади поперечного сечения проводника:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1)$$

где ρ - удельное сопротивление проводника;

l – длина проводника;

S – площадь поперечного сечения проводника.

Зависимость сопротивления проводника от температуры:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha t) \quad \text{или} \quad R_t = \alpha R_0 T,$$

где R_t – сопротивление при температуре t °С;

R_0 – сопротивление при 0 °С;

$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}$ - температурный коэффициент сопротивления, который

показывает, как изменяется сопротивление проводника по отношению к его сопротивлению при 0 °С, если температура изменяется на один градус;

T – термодинамическая температура.

Соединения сопротивлений: последовательное, параллельное, смешанное.

а) Последовательное соединение сопротивлений представляет собой систему проводников (сопротивлений), которые включены один за другим, так что через каждое из сопротивлений протекает один и тот же ток:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n.$$

Напряжение при последовательном соединении сопротивлений равно сумме напряжений на каждом из сопротивлений:

$$U_{\text{посл}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n = \sum_{i=1}^n U_i.$$

Напряжение на каждом из последовательно соединенных сопротивлений пропорционально значению данного сопротивления:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Распределение напряжения по последовательно соединенным элементам цепи (делитель напряжения):

$$U = U_0 \cdot \frac{R_1}{R},$$

где U_0 – напряжение на всем соединении;

U – напряжение на участке цепи с сопротивлением R_1 ;

R – полное сопротивление соединения;

R_1 – сопротивление участка цепи с выбранным сопротивлением.

Общее сопротивление цепи при последовательном соединении равно сумме отдельно взятых сопротивлений и оно больше наибольшего из включенных:

$$R_{\text{посл}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i.$$

Общее сопротивление цепи при последовательном соединении n одинаковых сопротивлений:

$$R_{\text{посл}} = nR_1,$$

где n – число сопротивлений, включенных последовательно;

R_1 = значение отдельно взятого сопротивления.

б) Параллельное соединение сопротивлений: признаком такого соединения является разветвление тока I на отдельные токи через соответствующие сопротивления. При этом ток I равен сумме токов через отдельно взятое сопротивление:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \sum_{i=1}^n I_i.$$

Общее напряжение при параллельном соединении равно напряжению на отдельно взятом сопротивлении:

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_i.$$

Связь между током и сопротивлением при параллельном соединении: при параллельном соединении сопротивлений токи в отдельных проводниках обратно пропорциональны их сопротивлениям:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Величина, обратная полному сопротивлению цепи (общая проводимость) при параллельном соединении, равна сумме проводимостей отдельно взятых проводников. При этом общее сопротивление цепи меньше наименьшего сопротивления из включенных:

$$G_{\text{пар}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum_{i=1}^n G_i; \quad \frac{1}{R_{\text{пар}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}.$$

Общая проводимость цепи при параллельном соединении n проводников:

$$G_{\text{пар}} = n \cdot G_1,$$

где $G_{\text{пар}}$ – проводимость цепи; G_1 – проводимость отдельного взятого проводника.

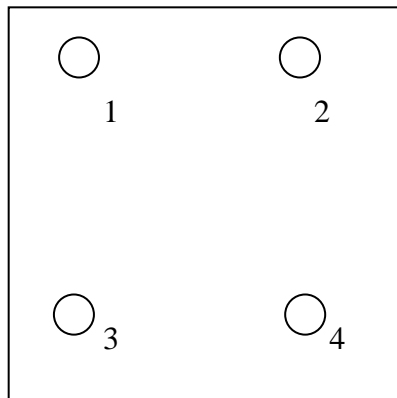
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание

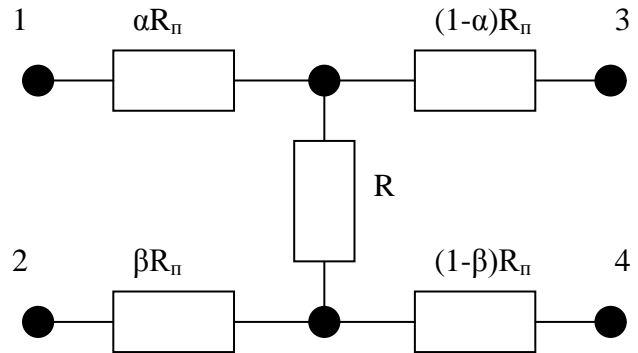
В закрытой коробке находится два медных провода (витая пара) одинаковой длины. Выводы, соответствующие началу линии и её концу, подписаны. Между проводами на расстоянии x от входа произошло нарушение изоляции. Определите длину L одного провода. Найдите расстояние до места повреждения изоляции. Вычислите сопротивление R повреждённой изоляции. Провести оценку погрешности всех выполненных измерений.

На рисунке 1 представлен внешний вид установки. Представим, что к клеммам подсоединены концы двухпроводной витой линии. В нормальном режиме эксплуатации без нарушений изоляции сопротивление между линиями 1-3 и 2-4 значительно. В случае повреждения изоляции возникает пробой между линиями, появляется сопротивление R между линиями (смотри схему внутренних соединений - рисунок 1б). В нашем случае места нарушения изоляции линий 1-3 и 2-4 смещены относительно друг друга незначительно,

поэтому можно считать, что $\alpha = \beta$.



а



б

Рисунок 1 - а- внешний вид установки, б- схема внутренних соединений

Ход выполнения работы

1. Найдём, какие из выводов принадлежит одному проводу. Произвольно обозначим выводы установки буквами а, b, с, d. Измерим сопротивления между всеми выводами установки. Значения сопротивлений заносим в таблицу 1.

Таблица 1

R_{ab}	R_{bc}	R_{cd}	R_{da}	R_{ac}	R_{bd}

2. Изучив данные таблицы 1 можно обнаружить две пары одинаковых значений сопротивлений, причем одна пара значений будет больше другой. Проанализировав схему, представленную на рисунке 1б, можно прийти к следующему выводу:

$$R_{13} = R_{24} < R_{14} = R_{23}$$

3. Учитывая все это, определяем соответствие между принятым обозначением выводов и схемой 1б, заполняем таблицу 2, подставляя в столбцы обозначения а, b, с, d.

Таблица 2

1	2	3	4

4. Из рисунка 1б очевидно, что сопротивление провода линии равно: $R_n = R_{13} = R_{24}$. Воспользовавшись формулой (1) определим длину провода:

$$L = \frac{SR_{\Pi}}{\rho}$$

Для расчетов принимаем провод медным ($\rho=17 \cdot 10^{-3}$ Ом·мм²/м). Сечение проводника определим по предоставленному образцу, воспользовавшись микрометром для определения диаметра и известной формулой для площади круга: $S=\pi d^2/4$.

5. Определим сопротивление места пробоя R и расстояние от начала линии до места пробоя. Из рисунка 1б очевидно, что:

$$R_{12} = 2\alpha R_{\Pi} + R, \quad (2)$$

$$R_{34} = 2(1-\alpha)R_{\Pi} + R \quad (3)$$

Вычитая уравнение (3) из (2), получим:

$$R_{12} - R_{34} = 2\alpha R_{\Pi} - 2(1-\alpha)R_{\Pi} = (4\alpha - 2)R_{\Pi}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{R_{12} - R_{34}}{4R_{\Pi}}$$

$$L_{\alpha} = \alpha L$$

Складывая уравнения (3) и (2), получим значение R :

$$R = \frac{1}{2}(R_{12} + R_{34} - 2R_{\Pi})$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Напишите формулы закона Ома для замкнутой цепи и для участка цепи.
2. Получите формулу для расчета сопротивления участка цепи при параллельном и последовательном соединении резисторов.
3. Напишите формулу закона Джоуля-Ленца, перечислите возможные причины нарушения изоляции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 2. - СПб.: "Лань", 2007 г., 480 с.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учебн. пособие: Для вузов. В 5 т. - М.:Физматлит, 2005. – 560 с.
3. Физика. Электростатика. Постоянный ток.: Конспект лекций/ В. М. Полунин, Г. Т. Сычёв. Курск. Гос. Техн. Ун-т. Курск, 2003. 185с.

Исследование температурной зависимости электрического сопротивления металлов

Цель работы: экспериментально исследовать зависимость электрического сопротивления металла от температуры.

Приборы и принадлежности: плитка нагревательная С-Mag HP 7 IKAtherm, образец из исследуемого металла, спиртовой термометр, установка для проведения эксперимента – Измеритель RLS АКИП-6101/1.

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Описание метода исследования температурной зависимости электрического сопротивления

Известно, что в широком диапазоне температур электрическое сопротивление металлов и сплавов меняется линейно с изменением температуры:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (1)$$

где R_0 , R_t – значения сопротивления соответственно при 0°C и при температуре $t^\circ\text{C}$;

$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}$ – температурный коэффициент сопротивления металла, который показывает, как изменяется сопротивление проводника, по отношению к его сопротивлению при 0°C , если его температуры изменяется на 1 градус (определяется экспериментально).

Электрическая схема установки представлена на рисунке 1. Из рисунка видно, что это мостовая схема, где R – известное сопротивление; R_x – неизвестное сопротивление. Участок цепи АДВ – переменное проволоочное сопротивление – реохорд. ℓ

Условием равновесия такой цепи является равенство потенциалов точек С и Д (а, следовательно, отсутствие тока на участке цепи СД). В этом случае стрелка гальванометра, включённого в цепь АД, устанавливается в нулевое положение.

Используя второй закон (правило) Кирхгофа, исходя из условия равновесия моста, можно получить:

$$R_x = R \frac{R_2}{R_1}, \quad (2)$$

где R_x – исследуемое сопротивление;

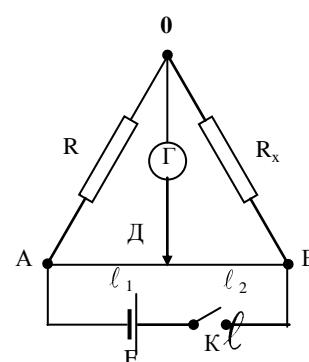


Рис. 1

R – известное сопротивление, набранное с помощью магазина сопротивлений;
 R_1' , R_2' – сопротивления участков цепи АД и ДВ (плечей реохорда – переменного проволочного сопротивления).

Так как сопротивления плеч реохорда:

$$R_1' = \rho \frac{l_1}{S}; R_2' = \rho \frac{l_2}{S}, \quad (3)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление проводника, из которого изготовлен реохорд (переменное проволочное сопротивление); l_1 , l_2 – длина плеч реохорда; S – площадь поперечного сечения проводника, то

$$\frac{R_1'}{R_2'} = \frac{l_1}{l_2}. \quad (4)$$

Таким образом, для неизвестного сопротивления R_x будем иметь:

$$R_x = R \frac{l_2}{l_1} \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что условие равновесия такой мостовой схемы можно получить двумя способами.

Способ № 1. С помощью декадных переключателей устанавливают какое-либо известное сопротивление R . С помощью ручки переменного сопротивления АДВ (реохорда) добиваются такого состояния, при котором стрелка гальванометра установится на нулевое значение. Подставив значения R , l_1 , l_2 в формулу (5), можно определить неизвестное сопротивление R_x .

Способ № 2. Так как при $l_1 = l_2$, $R_x = R$. Следовательно, установив одинаковые значения сопротивлений (длин) плеч реохорда, с помощью декадных переключателей можно добиться такого состояния, при котором стрелка гальванометра установится на нулевое значение. Сопротивление, определенное по формуле (5), будет равно неизвестному сопротивлению. Данный способ применяется при выполнении эксперимента в данной лабораторной работе.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из магазина сопротивлений, источника постоянного тока, выключателя, гальванометра и вольтметра смонтированных в едином корпусе, исследуемого сопротивления R_x , термометра, ванны с жидкостью (водой) – ВЖ, термометра, нагревательного элемента (электрической плитки с закрытой спиралью) – НЭ.

Внешний вид установки представлен на рисунке 2.

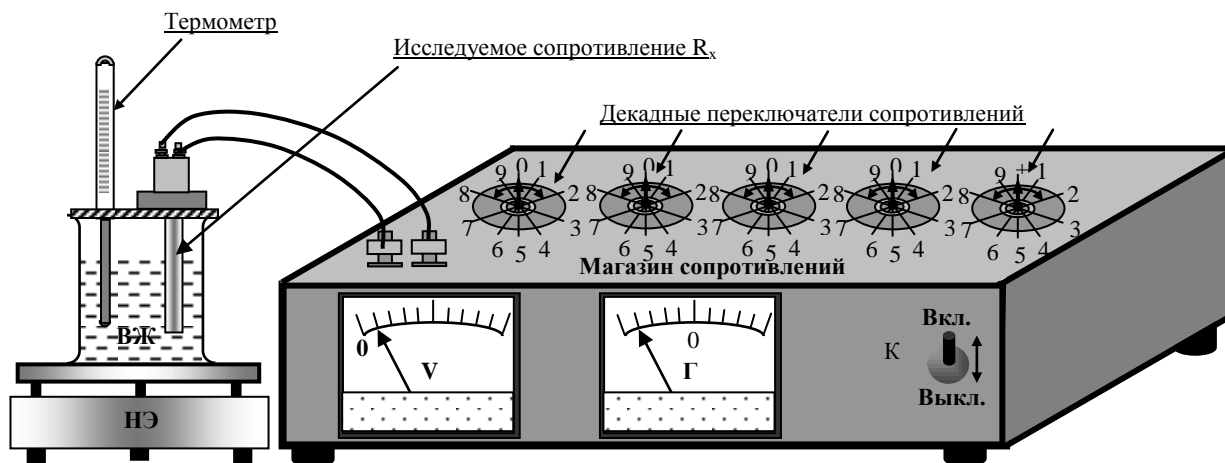


Рисунок 2 - Внешний вид установки

Магазин сопротивлений представляет собой набор последовательно соединённых резисторов (сопротивлений) сгруппированных в декады и расположенных на декадных переключателях, закреплённых на внутренней стороне панели. Магазин имеет 7 декад, пять из которых (« $\times 10000$ Ом», « $\times 1000$ Ом», « $\times 100$ Ом», « $\times 10$ Ом», « $\times 1$ Ом»,) состоят из резисторов сопротивлением соответственно 10000, 1000, 100, 10, 1 Ом. Две декады, « $\times 0,1$ Ом» и « $\times 0,01$ Ом», состоят из 10 манганиновых спиралей, сопротивлением 0,1 и 0,01 Ом соответственно, в данной работе могут не использоваться.

Перед началом работы рукоятки всех декадных переключателей необходимо несколько раз провернуть.

Набор требуемого сопротивления производится с помощью ручек декадных переключателей. Отчёт производится по формуле:

$$R_x = (X_1 \cdot 10000 + X_2 \cdot 1000 + X_3 \cdot 100 + X_4 \cdot 10 + X_5 \cdot 1), \quad (6)$$

где X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 – показатели рукояток переключателей соответственно на « $\times 10000$ Ом», « $\times 1000$ Ом», « $\times 100$ Ом», « $\times 10$ Ом», « $\times 1$ Ом».

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включают установку в сеть (\sim , 220 В), соблюдая при этом правила техники безопасности. Выключателем К включают источник питания. Определяют величину исследуемого сопротивления при комнатной температуре. Для этого с помощью ручек декадных переключателей магазина сопротивлений добиваются отсутствия тока в гальванометре (уравновешивания моста). С учётом того, что $l_1 = l_2$, по формуле (6) рассчитывают искомое сопротивление.

2. Включают нагреватель. Повышают температуру на 10 градусов. Аналогично пункту (1) производят измерение сопротивления образца при данной температуре. Подобные измерения сопротивления исследуемого образца проводят до температуры 70°-80°С.

3. Выключают нагреватель. Выливают горячую воду из ванны с жидкостью ВЖ, наливают в неё холодную воду. Повторяют все измерения при тех же самых температурах. Результаты измерений заносят в таблицу.

4. Рассчитывают среднее значение сопротивления исследуемого образца при данной температуре из двух опытов. Строят график зависимости сопротивления металла от температуры (график чертят на миллиметровой бумаге).

В выводах по работе, которые следует записать в конце отчета, необходимо оценить абсолютную и относительную погрешности, и сравнить экспериментальные кривые температурной зависимости с теоретическими.

Таблица 1

$t, ^\circ\text{C}$		30	40	50	60	70	80	90
Экспериментальные значения	R_{x1}							
	R_{x2}							
	$\langle R_x \rangle$							
Теоретические значения	R_x							

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Постоянный электрический ток. Основные действия и условия существования постоянного тока. Сторонние силы. Проводники и изоляторы.

2. Характеристики постоянного электрического тока: сила (величина) тока, плотность тока. Электродвижущая сила, напряжение и разность потенциалов. Их физический смысл. Связь между ЭДС, напряжением и разностью потенциалов.

3. Закон Ома для неоднородного участка цепи. Разветвлённые электрические цепи. Правила Кирхгофа и их применение.

4. Классическая электронная теория электропроводности металлов и ее опытные обоснования. Закон Ома в дифференциальной и интегральной формах. Закон Ома для участка цепи, полной цепи.

5. Электрическое сопротивление (электропроводимость). Природа электрического сопротивления металлов. Температурная зависимость сопротивления проводников и объяснение этой зависимости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полунин, В.М. Физика. Электростатика. Постоянный электрический ток [Текст]: конспект лекций / В.М. Полунин, Г.Т. Сычев; Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2004. 196 с.
2. Полунин, В.М. Физика. Основные понятия и законы [Текст]: учебно – методическое пособие /В.М.Полунин, Г.Т.Сычев; Курск. гос. техн. ун – т. Курск, 2002.
3. Трофимова, Т.И. Курс физики [Текст]: учеб. пособие. / Т.И. Трофимова; 7-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2002. 542 с.
4. Савельев, И.В. Курс общей физики [Текст]: учеб. пособие для вузов: 5 кн. / И.В. Савельев. М: Изд – во «Астрель», 2002. Кн.1. 336 с.

Лабораторная работа № 5

Эффект Зеебека

Цель работы: запись характеристик различных термопар и определение их чувствительности.

Приборы и принадлежности: Лабораторная установка "Эффект Зеебека" в комплектации: набор из 3 термопар, термометр (20 — 110°C), клипса для термометра, набор из 10 высоких мерных стаканов, магнитное перемешивающее устройство с нагревателем, микровольтметр.

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА



Если концы металлической проволоки имеют разную температуру, то поскольку скорости теплового движения электронов будут разными, возникнет тепловая диффузия. Поскольку тепловое движение электронов на горячем конце быстрее, чем на холодном конце, в среднем больше электронов будет перемещаться от теплого конца к холодному, чем в обратном направлении. Ток, появляющийся вследствие этой диффузии, приводит к тому, что холодный конец становится отрицательно заряженным по отношению к теплomu концу,

вызывая появление напряжения между двумя концами. Это оказывает возрастающее воздействие на поток электронов до тех пор, пока ток диффузии не перестает течь.

Возникающее напряжение тепловой диффузии U_{td} пропорционально разности температур двух концов $T_1 - T_2$, а коэффициент этой пропорциональности называется коэффициентом Зеебека:

$$U_{td} = k \cdot (T_1 - T_2), \quad (1)$$

где U_{td} – напряжение тепловой диффузии, k – коэффициент Зеебека, T_1 – температура на горячем конце, T_2 – температура на холодном конце.

Если соединить два разнородных металла, поместить точки контактов в среды с разными температурами и подключить вольтметр между двумя концами, которые не соединены, получится термопара. Тогда вольтметр будет показывать напряжение, которое прямо пропорционально разности температур между точками контакта:

$$U_{th} = U_{td,B} - U_{td,A} = (k_B - k_A) \cdot (T_1 - T_2), \quad (2)$$

где U_{th} – напряжение термопары, $U_{td,A}$, $U_{td,B}$ – напряжения тепловой диффузии металлов А и В, k_A , k_B – коэффициенты Зеебека для металлов А и В.

Без труда можно измерить только разность коэффициентов Зеебека

$$k_{BA} = k_B - k_A, \quad (3)$$

которая входит в выражение (2). Она соответствует чувствительности термопары, состоящей из металлов А и В, определяемой следующим выражением:

$$S = \frac{dU_{th}}{dT_1} \quad (4)$$

В качестве эталонного материала широко используется платина, Pt, и, таким образом коэффициенты обозначаются K_{APt} .

В опыте исследуется чувствительность S трех разных пар металлов. Вода в мерном стакане нагревается до температуры T_1 , и один конец термопары погружается в нее. Другой конец термопары подключается к микровольтметру для измерения напряжения. Гнезда микровольтметра имеют постоянную температуру T_2 .

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерение зависимости напряжения термопары U_{th} от температуры T_1 и подтверждение наличия линейной взаимосвязи между ними в случае трех разных термопар.

По результатам опыта строится график напряжения термопары от температуры, U_{th} от T_1 для каждой из трех термопар. Каждый набор точек

аппроксимируется прямой линией, и чувствительности каждого из элементов можно определить по наклонам этих прямых.

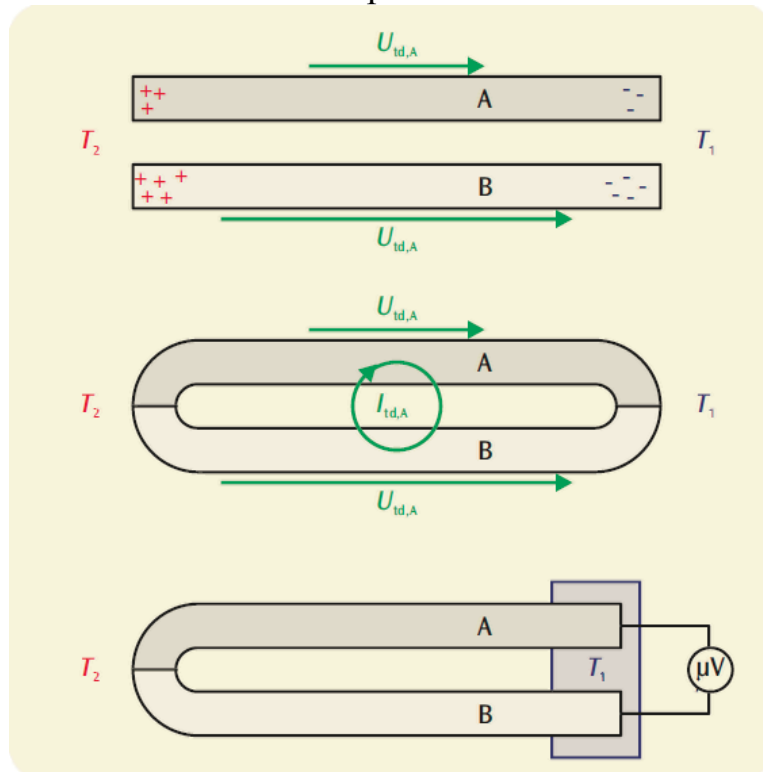


Рисунок 1 – Тепловая диффузия в металлических проволоках (вверху), термоэлектрический ток (в центре) и напряжение термопары в контуре из двух разных металлов (внизу).

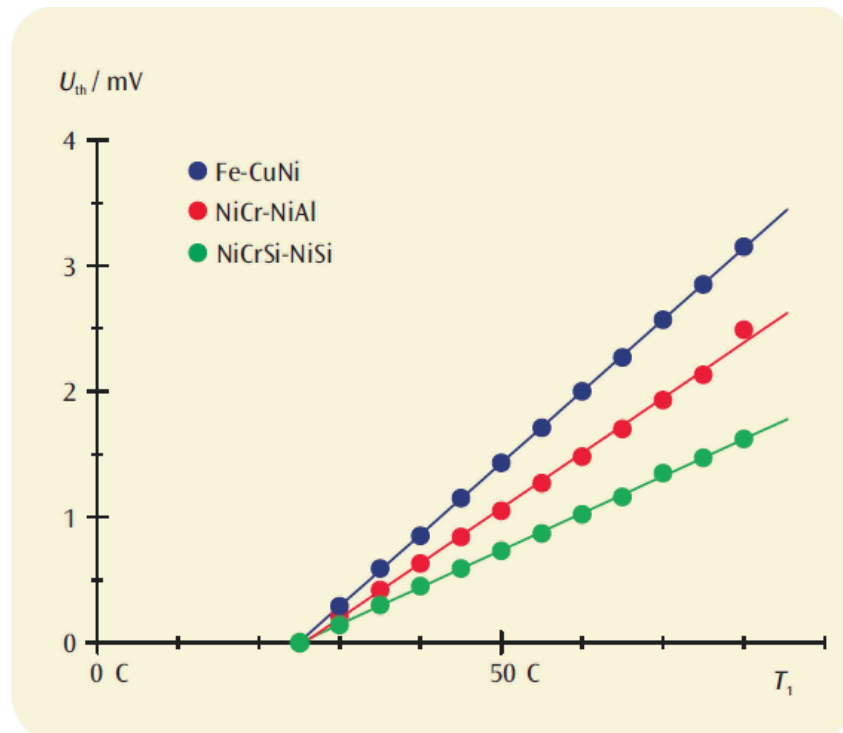


Рисунок 2 – Зависимость напряжений термопар от температуры для термопар Fe-CuNi, NiCr-NiAl и NiCrSi-NiSi. Характеристики, построенные по результатам измерений, пересекают ось T_1 на графике при эталонной температуре $T_2=23^\circ\text{C}$.

2. Определение чувствительности S по графикам зависимости U_{th} от T_1 .
3. Оценка эталонной температуры T_2 по полученным кривым.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. В чем заключается эффект термо-э.д.с.?
2. Нарисуйте принципиальную электрическую схему установки.
3. Выведите расчетную формулу для определения постоянной термопары.
4. Изложите порядок выполнения работы.
5. Расскажите о практических приложениях эффекта термо-э.д.с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Физика. Т.3.М.: Высшая школа, 1982, с. 215-219.
2. Савельев И.В. Физика. Т.1.М.: Наука, 1982, с. 320-360.
3. Ю.К. Ларабутов. Введение в физику полупроводников, М.: Наука. 1970. с. 113-115.

Лабораторная работа № 6

Эффект холла в полупроводниках

Цель работы: Исследование механизмов электрической проводимости в легированном германии с эффектом Холла.

Приборы и принадлежности: Лабораторная установка "Эффект Холла в полупроводниках" в комплектации: базовый аппарат для изучения эффекта Холла, легированный донорной примесью германий на печатной плате, легированный акцепторной примесью германий на печатной плате, датчик магнитного поля ± 2000 мТл, катушка модели D на 600 витков, U-образный сердечник, пара полюсных наконечников и зажимных скоб для изучения эффекта Холла, трансформатор с выпрямителем, источник питания постоянного тока, универсальный цифровой измерительный прибор, прибор ЗВ NETlog™, набор из 15 безопасных соединительных проводов для опытов длиной 75 см. программное обеспечение ЗВ NETlab™

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА



Эффект Холла наблюдается в электропроводящих материалах, помещенных в магнитное поле B . Этот эффект обусловлен силой Лоренца, которая изменяет направление движения носителей заряда, создавая электрический ток I , протекающий в образце материала перпендикулярно по отношению к магнитному полю, и направлением тока. Разделение зарядов приводит к появлению электрического поля E_H , которое перпендикулярно направлению тока и компенсирует силу Лоренца, создавая напряжение Холла U_H между краями образца. Знак напряжения Холла меняется в зависимости от того, обусловлен ли один и тот же ток I положительными или отрицательными носителями заряда. Его значение зависит от плотности носителей заряда.

Следовательно, эффект Холла представляет собой важное средство определения механизмов переноса зарядов в проводящих материалах и часто используется для изучения легированных полупроводников.

В этом опыте кристаллы легированного германия исследуются в диапазоне температур от 300 К до 450 К, чтобы убедиться в разнице проводимости, достигаемой за счет легирования, и собственной проводимости, получаемой за счет тепловой активации электронов, вызывающей их переход из валентной зоны в зону проводимости.

Кристаллы представляют собой плоские образцы, которые имеют длину a , ширину b и толщину d , и проводят ток I в продольном направлении. Магнитное поле B пронизывает каждый образец перпендикулярно направлению тока. Возникающее в результате напряжение Холла равно:

$$U_H = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d} \quad (1)$$

Коэффициент Холла составляет:

$$R_H = \frac{1}{e} \cdot \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{(n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n)^2}, \quad (2)$$

$e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл (элементарный заряд).

Плотности n_n и n_p , соответственно, электронов в зоне проводимости и дырок в валентном слое, а также подвижности (mobility) μ_n и μ_p , соответственно, электронов и соответствующих им дырок являются величинами, характеризующими данный материал, которые зависят от температуры образца T .

Помимо напряжения Холла, в данном опыте измеряется падение напряжения в продольном направлении U в образце для определения электропроводности:

$$\sigma = e \cdot (n_n \cdot \mu_n + n_p \cdot \mu_p) \quad (3)$$

В процессе этого также определяется подвижность Холла:

$$\mu_H = R_H \cdot \sigma = \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n} \quad (4)$$

На плотности носителей заряда n_n и n_p влияет легирование, т.е. включение инородных атомов в кристалл. В случае легирования акцепторной примесью атомы акцептора связывают электроны из валентной зоны и тем самым образуют дырки в этой зоне. В случае легирования донорной примесью каждый атом донора отдает один электрон в зону проводимости. Легированные кристаллы электрически нейтральны, т.е. их отрицательные и положительные заряды компенсируют друг друга. Соответственно:

$$n_n + n_A = n_p + n_D, \quad (5)$$

n_A : концентрация акцепторов, n_D : концентрация доноров.

Кроме того, n_n и n_p связаны законом действующих масс, количество пар «электрон - дырка», которые образуются и рекомбинируют в единицу времени, одинаково в состоянии равновесия, которое зависит от температуры. К ним применимо следующее выражение:

$$n_n \cdot n_p = n^2, \quad (6)$$

n_i - плотность носителей заряда в случае только собственной проводимости.

Поэтому в общем случае имеем:

$$n_n = \sqrt{n_i^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_D - n_A}{2}, \quad (7)$$

$$n_p = \sqrt{n_i^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_A - n_D}{2}. \quad (8)$$

При комнатной температуре концентрации n_A и n_D существенно выше плотности носителей заряда в случае только собственной проводимости n_i . Следовательно:

$$R_H = -\frac{1}{n_D \cdot e}, \quad \mu_H = \mu_n, \quad (9)$$

при добавлении донорной примеси при температуре 300 К

$$R_H = -\frac{1}{n_A \cdot e}, \quad \mu_H = \mu_p$$

при добавлении акцепторной примеси при температуре 300 К.

Тогда плотность и знак носителей заряда можно получить непосредственно из коэффициента Холла. Подвижность носителей заряда эквивалентна подвижности Холла.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Демонстрация эффекта Холла в легированном германии.

По мере того, как с увеличением температуры появляется больше носителей, обеспечивающих электрический ток, напряжение Холла убывает, пока не достигнет нуля.

В случае германия, легированного акцепторной примесью, знак напряжения Холла меняется, потому что возрастающая собственная проводимость приводит к доминирующему влиянию электронов, подвижность

рп которых выше. Проводимость, обусловленная легированием, преобладает при температурах ниже температуры инверсии, а собственная проводимость преобладает при температурах выше температуры инверсии.

При высоких температурах кристаллы, легированные донорными и акцепторными примесями, становятся неотличимы друг от друга, потому что:

$$n_n = n_p = n_i, R_H = -\frac{1}{n_i \cdot e} \cdot \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p}$$

Зависимость подвижности μ_n от температуры не видна явным образом в коэффициенте Холла, потому что в обоих случаях:

$$\mu \sim T^{-\frac{3}{2}}$$

2. Измерить зависимость напряжения Холла от тока и магнитного поля при комнатной температуре.

3. Определить знак плотности и мобильности носителей заряда при комнатной температуре.

4. Измерить зависимость напряжения Холла от температуры образца.

5. Определить температуру инверсии; установить различия между примесной и собственной проводимостью в случае германия, легированного акцепторной примесью.

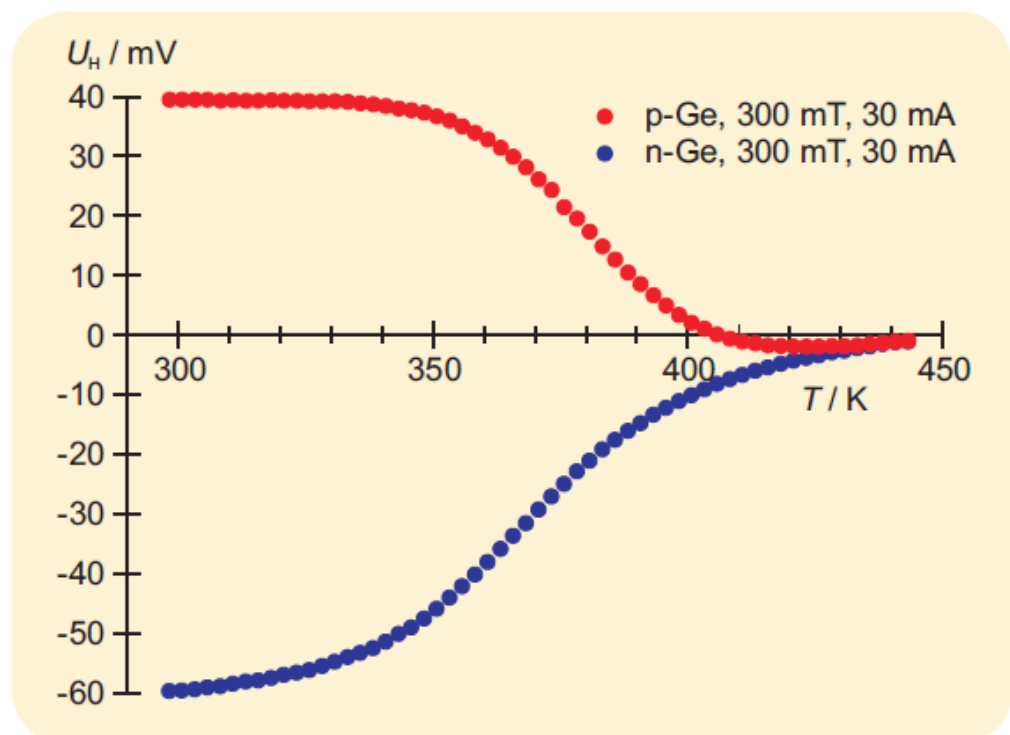


Рисунок 1 – Зависимость напряжения Холла в германии, легированном акцепторной и донорной примесями, от температуры T

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Что означают термины слабое магнитное поле, сильное магнитное поле.
2. Общая характеристика гальваномагнитных явлений. Механизм возникновения эффекта Холла. Эффект Холла в полупроводнике с одним сортом носителей. Как определить знак основных носителей из измерений эффекта Холла?
3. Какими физическими величинами определяется ЭДС Холла? Объясните зависимость ЭДС Холла от величины индукции магнитного поля.
4. Каким образом механизмы рассеяния влияют на величину постоянной Холла. В каком случае холловская и дрейфовая подвижности равны.
5. Эффект Холла в полупроводнике с двумя сортами носителей. Выведите формулу для постоянной Холла в случае биполярной проводимости.
6. Нарисуйте и объясните зависимость постоянной Холла от температуры. При каких условиях наблюдается разрыв на зависимости $\lg RH(T)$.
7. Какую информацию о полупроводнике можно получить из совместных измерений электропроводности и эффекта Холла? Какую информацию можно получить при исследовании эффекта Холла в классически сильных магнитных полях?
8. Методика измерений эффекта Холла на образце прямоугольной формы. ЭДС побочных эффектов, их учет при измерении холловского напряжения.
9. Методика измерений эффекта Холла на плоском образце произвольной формы (метод Ван-дер-Пау).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шалимова К. В. Физика полупроводников. - М.: Энергоатомиздат, 1985 - 392 с.
2. Зеегер К. Физика полупроводников. - М.: Мир, 1977 – 615 с.
3. Кучис Е. В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. - М.: Радио и связь, 1990 – 264 с.
4. Бонч-Бруевич В. Ш., Калашников С. Г. Физика полупроводников. - М.:Наука, 1990 – 678 с.