

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

**Г. М. Шахлевич, М. В. Тумилович**

## **МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики  
и радиоэлектроники в качестве пособия для специальностей  
6-05-0713-02 «Электронные системы и технологии»,  
6-05-0713-06 «Электронное машиностроение»*

Минск БГУИР 2026

УДК 620.22(076.5)  
ББК 30.3я73  
ШЗ1

Рецензенты:

кафедра «Материаловедение в машиностроении»  
Белорусского национального технического университета  
(протокол № 5-24/25 от 12.12.2024);

профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники  
Белорусского государственного университета  
доктор физико-математических наук, профессор,  
член-корреспондент НАН Беларуси Н. А. Поклонский

**Шахлевич, Г. М.**

ШЗ1

Материалы электронной техники. Лабораторный практикум :  
пособие / Г. М. Шахлевич, М. В. Тумилович. – Минск : БГУИР,  
2026. – 75 с. : ил.

ISBN 978-985-543-844-2.

Включает в себя лабораторные работы по исследованию механических свойств конструкционных материалов, определению электрофизических характеристик полупроводников по данным измерений эффекта Холла и фотопроводимости, изучению методов контроля и исследованию магнитных свойств ферро- и ферромагнетиков и электрической прочности твердых диэлектриков.

Предназначено для закрепления теоретических знаний студентов, полученных ими на аудиторных занятиях и в процессе самостоятельного изучения дисциплины, приобретения навыков исследований свойств материалов электронной техники.

**УДК 620.22(076.5)  
ББК 30.3я73**

**ISBN 978-985-543-844-2**

© Шахлевич Г. М., Тумилович М. В., 2026  
© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2026

## Содержание

<b>Лабораторная работа № 1.</b> Определение электрофизических свойств полупроводников по измерениям ЭДС Холла .....	4
<b>Лабораторная работа № 2.</b> Исследование электрической прочности твердых диэлектриков.....	18
<b>Лабораторная работа № 3.</b> Исследование механических свойств конструкционных материалов.....	32
<b>Лабораторная работа № 4.</b> Исследование характеристик магнитных материалов .....	48
<b>Лабораторная работа № 5.</b> Исследование влияния легирования на электропроводность кремния и время жизни носителей заряда .....	62
<b>Список использованных источников.....</b>	<b>74</b>

## Лабораторная работа № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ЭДС ХОЛЛА

**Цель работы:** знакомство с природой и основами применения эффекта Холла, получение практических навыков исследования зависимости ЭДС Холла от индукции магнитного поля и тока, протекающего через исследуемый образец, определение типа носителей заряда и ширины запрещенной зоны полупроводников на основе температурных зависимостей ЭДС Холла.

#### 1.1. Краткие теоретические сведения

##### 1.1.1. Основные характеристики носителей электрических зарядов

Экспериментальное исследование эффекта Холла является эффективным методом изучения движения электрических зарядов, обуславливающих электрический ток в проводниках как с металлической, так и с полупроводниковой проводимостью. Эффект Холла несет информацию о таких важнейших характеристиках проводников, как концентрация носителей тока и знак носителей тока. В полупроводниках он позволяет установить принадлежность полупроводника к  $n$ -типу (с электронной проводимостью) или к  $p$ -типу (с дырочной проводимостью), благодаря чему является одним из важнейших методов исследования полупроводников.

Одними из основных характеристик полупроводниковых материалов являются концентрация и подвижность носителей заряда, а также ширина запрещенной зоны. Эти характеристики определяют их электропроводность  $\sigma$ .

В общем случае удельная электропроводность полупроводника зависит от концентрации электронов  $n$  и дырок  $p$ , их подвижностей  $\mu_n$  и  $\mu_p$ :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = e(n\mu_n + p\mu_p), \quad (1.1)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление.

В случае примесной проводимости, когда один тип носителей заряда преобладает над другим, в формуле (1.1) одним из слагаемых можно пренебречь. Тогда для полупроводника с электронной проводимостью (полупроводник  $n$ -типа):

$$\sigma = en\mu_n, \quad (1.2)$$

а для полупроводника  $p$ -типа:

$$\sigma = ep\mu_p. \quad (1.3)$$

В данной лабораторной работе исследуется полупроводник с примесной проводимостью. Определение концентрации носителей заряда, их знака и подвижности осуществляется на основе эффекта Холла.

*Эффект Холла* – одно из *гальваномагнитных* явлений, возникающих при одновременном воздействии на движущийся электрон электрического и магнитного полей.

*Гальваномагнитные явления* – явления, возникающие в результате воздействия магнитного поля на электрические свойства материалов (металлов, полупроводников), по которым протекает электрический ток. При приложении магнитного поля напряженностью  $H$  в материале изменяется электрическое сопротивление либо возникает дополнительное электрическое поле при протекании электрического тока плотностью  $j$ .

Различают симметричные и антисимметричные гальванические явления, которые соответственно не меняют или меняют знак при изменении направления линий магнитного поля. Важный пример антисимметричных гальванических явлений – эффект Холла (возникновение напряженности электрического поля  $E$  в направлении, перпендикулярном магнитному полю  $B$  и току  $I$ ). Пример симметричных гальванических явлений – магнитосопротивление (МС), т. е. зависимость удельного сопротивления  $\rho$  материалов от магнитного поля  $B$ .

Гальваномагнитные явления подразделяют на продольные и поперечные в зависимости от того, в каком направлении они проявляются относительно вектора электрического поля. К поперечным гальваномагнитным явлениям относят эффекты Холла и Эттингсгаузена, к продольным – изменение продольного сопротивления в магнитном поле и эффект Нернста.

Пусть в однородном полупроводнике в форме прямоугольной пластины длиной  $l$ , шириной  $d$  и толщиной  $b$  течет ток вдоль оси  $x$  (рис. 1.1).

Перпендикулярные направлению тока плоскости являются эквипотенциальными, поэтому разность потенциалов между точками  $A$  и  $B$  будет равна нулю. Если пластину поместить в магнитное поле, вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  которого направлен вдоль оси  $Y$ , то между точками  $A$  и  $B$  возникает разность потенциалов, которая называется *холловской* или *ЭДС Холла*.

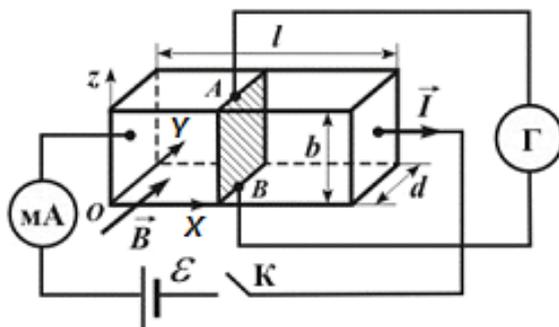


Рис. 1.1. Однородный полупроводник в форме прямоугольной пластины

Экспериментально установлено, что эта разность потенциалов  $\Delta\varphi$  прямо пропорциональна току в пластине, индукции магнитного поля и обратно пропорциональна толщине пластины, это значит

$$\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_B = R \frac{IB}{d}. \quad (1.4)$$

Коэффициент пропорциональности  $R$  зависит от рода вещества и называется постоянной Холла.

Возникновение ЭДС Холла объясняется взаимодействием носителей заряда с магнитным полем.

На заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила Лоренца, перпендикулярная скорости частицы  $\vec{v}$  и вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ :

$$\vec{F} = e[\vec{v}, \vec{B}]. \quad (1.5)$$

Под действием этой силы носители заряда будут смещаться, в результате на гранях пластины возникнут заряды разного знака. Между гранями возникает холловская разность потенциалов, а внутри пластины – поперечное электрическое поле напряженностью  $E$ , направление которого, как видно из рис. 1.2, зависит от знака носителей заряда.

Напряженность этого поля рассчитывается по формуле

$$E = \frac{\varphi_A - \varphi_B}{b}, \quad (1.6)$$

где  $\varphi_A - \varphi_B$  – разность потенциалов Холла;  
 $b$  – ширина пластины.

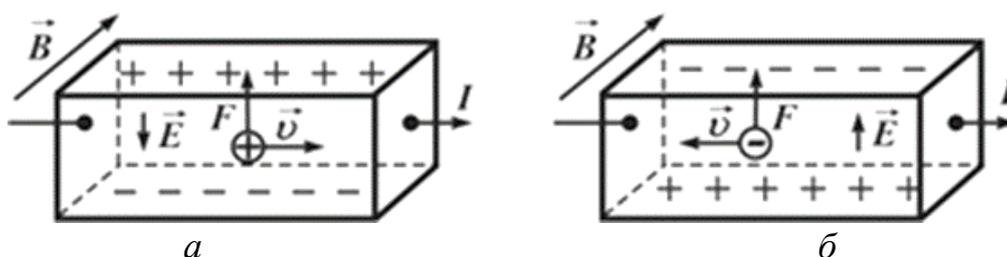


Рис. 1.2. Направление тока и магнитного поля

Направление силы Лоренца, а следовательно, и направление смещения линий носителей заряда определяется по правилу левой руки. Если направление тока и линий магнитного поля такие, как показано на рис. 1.2, то и электроны, и дырки будут смещаться вверх. Поэтому в образце с дырочной проводимостью  $p$ -типа (рис. 1.2,  $a$ ) верхняя грань заряжена положительно, а нижняя – отрицательно. В образце  $n$ -типа (рис. 1.2,  $b$ ) наоборот, смещающиеся вверх электроны заряжают верхнюю грань отрицательно, а нижнюю – положительно. Таким образом, по знаку ЭДС Холла можно определить знак носителей заряда.

Постоянную Холла  $R$  в формуле (1.4) можно выразить через концентрацию носителей заряда. Для этого воспользуемся тем условием, что в стационарном состоянии сила Лоренца, действующая на носители заряда, уравновешена электростатической силой. Поэтому  $e v B = e E$ , откуда

$$v B = E. \quad (1.7)$$

Будем считать, что пластина изготовлена из полупроводника  $n$ -типа. Тогда из формул (1.4) и (1.6) с учетом того, что ток равен, следует

$$I = j S = n e v S = n e v b d, \quad (1.8)$$

где  $j$  – плотность тока;

$S = b d$  – площадь сечения образца;

$n, e$  – концентрация и заряд носителей тока;

$v$  – дрейфовая скорость.

Из выражения (1.8) следует

$$R = \frac{1}{n e}. \quad (1.9)$$

Очевидно, что для полупроводника  $p$ -типа

$$R = \frac{1}{p e}, \quad (1.10)$$

где  $p$  – концентрация дырок.

Формулы (1.9) и (1.10) дают возможность определить концентрацию электронов  $n$  или дырок  $p$ , если экспериментально будет определена постоянная Холла. Если экспериментально определить и удельное сопротивление полупроводника, то можно вычислить и подвижности электронов  $\mu_n$  или дырок  $\mu_p$ .

Действительно, используя закон Ома в дифференциальной форме  $j = \sigma E$  и учитывая, что  $j = n e v$ , получим

$$n e v = \sigma E = \frac{1}{\rho} E, \quad (1.11)$$

Откуда

$$\frac{1}{n e} = \rho \frac{v}{E} = \rho \mu, \quad (1.12)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление образца полупроводника;

$\mu$  – подвижность носителей заряда.

Из формул (1.9) и (1.11) следует

$$\mu = \frac{R}{\rho}. \quad (1.13)$$

Для определения удельного сопротивления образца полупроводника необходимо измерить его сопротивление  $R$ , длину  $l$ , площадь поперечного сечения  $S$  и вычислить  $\rho$  по формуле

$$\rho = \frac{RS}{l} = \frac{US}{I l}. \quad (1.14)$$

### 1.1.2. Границы применимости теории

Рассмотренный эффект Холла, причиной которого является воздействие на движущиеся в магнитном поле заряды силы Лоренца, называется классическим эффектом Холла. Для классического эффекта Холла характерна линейная зависимость  $\varepsilon(B)$ . Опыт между тем показывает, что в природе есть вещества, для которых эта зависимость нелинейна. Это свидетельствует о существовании другой причины эффекта Холла, которая, однако, может быть понята только с позиций квантовой теории твердого тела.

В *полупроводниках* эффект Холла имеет в основном классическую природу. Для классической постоянной Холла предполагается, что все носители тока имеют одинаковую скорость движения  $v$ , которая к тому же не изменяется при движении носителей тока в веществе. Не учитывается, следовательно, что при движении в реальном веществе носители тока испытывают столкновения и потому рассеиваются на примесях, на колебаниях решетки. Учет рассеяния носителей тока в веществе приводит к несколько иному выражению для  $R$ , вид которого зависит от механизма рассеяния.

### 1.1.3. Применение эффекта Холла

Эффект Холла применяется в следующих случаях.

1. *Измерение магнитных полей.* Путем измерения напряжения Холла можно определить величину и направление линий магнитного поля. Это особенно полезно в областях, где требуется точное измерение магнитных полей, например в магнитных резонансных томографах (МРТ) или в научных исследованиях магнитных материалов.

2. *Датчики тока.* Эффект Холла используется для создания датчиков тока. При прохождении тока через проводник с магнитным полем возникает напряжение Холла, которое пропорционально силе тока. Это позволяет измерять ток с высокой точностью и без контакта с проводником. Датчики тока на основе эффекта Холла широко применяются в электронике, автомобильной промышленности и энергетике.

3. *Датчики скорости и положения.* Эффект Холла также используется для создания датчиков скорости и положения. При движении проводника с магнитным полем возникает напряжение Холла, которое зависит от скорости и направления движения. Это позволяет измерять скорость и положение объектов

с высокой точностью. Датчики скорости и положения на основе эффекта Холла применяются в промышленности, робототехнике и других областях.

4. *Магнитная память.* При записи информации на магнитный носитель происходит изменение магнитного поля, что влияет на напряжение Холла. Это позволяет хранить и считывать информацию с высокой плотностью и скоростью. Магнитная память на основе эффекта Холла используется в компьютерах, жестких дисках и других устройствах хранения данных.

#### 1.1.4. Зависимость электропроводности от температуры

Для того чтобы найти зависимость электропроводности от температуры, необходимо выяснить, как изменяются концентрации носителей заряда и их подвижности с изменением температуры. Рассмотрим собственный полупроводник, не содержащий примесей. Пусть ширина его запрещенной зоны равна  $\Delta E_g$ .

Для участия в электрическом токе валентный электрон должен перейти из связанного состояния в валентной зоне в свободное состояние в зоне проводимости. При этом в зоне проводимости образуется свободный электрон, а в валентной зоне свободная дырка. Очевидно, что минимальная энергия, необходимая для такого перехода, равна ширине запрещенной зоны  $\Delta E_g$ . Эта энергия может быть сообщена электрону за счет теплового движения. Концентрация собственных носителей заряда определяется по формуле

$$n_i = \sqrt{N_C \cdot N_V} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right), \quad (1.15)$$

где  $N_V$  и  $N_C$  – эффективная плотность состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно:

$$N_V = \frac{2 \cdot (2\pi \cdot m_p \cdot k \cdot T)^{\frac{3}{2}}}{h^3}, \quad N_C = \frac{2 \cdot (2\pi \cdot m_n \cdot k \cdot T)^{\frac{3}{2}}}{h^3}, \quad (1.16)$$

где  $m_n, m_p$  – эффективные массы электронов и дырок;

$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;

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

Для собственного полупроводника применимо соотношение «действующих масс»:

$$n_i^2 = n \cdot p. \quad (1.17)$$

Концентрация носителей в донорных ( $n \gg p$ ) и акцепторных ( $p \gg n$ ) полупроводниках определяется из соотношений:

$$n = \sqrt{N_C \cdot N_d} \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right), \quad p = \sqrt{N_V \cdot N_a} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{2kT}\right), \quad (1.18)$$

где  $N_d, N_a$  – концентрация атомов доноров и акцепторов соответственно;

$E_d, E_a$  – положение донорного и акцепторного уровней соответственно.

Рассмотрим зависимость подвижности носителей заряда от температуры. По определению дрейфовая подвижность равна отношению дрейфовой скорости к напряженности электрического поля  $\mu = \frac{v_n}{E} = \frac{e\tau_n}{m_n^*}$ , подставляя время релаксации, равное  $\tau = \frac{A}{\sqrt{\frac{3kT^3}{m_n^*}}}$ , получим выражение для вычисления подвижности электронов:

$$\mu_n = \frac{eA}{\sqrt{3km_n^*}} T^{-\frac{3}{2}} = BT^{-\frac{3}{2}}. \quad (1.19)$$

Аналогично для дырок

$$\mu_p = CT^{-\frac{3}{2}}. \quad (1.20)$$

Из формул (1.1), (1.15), (1.18), (1.19) получаем выражение для электропроводности собственного полупроводника:  $\sigma_i = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E_0}{2kT}}$ .

Прологарифмировав последнее выражение, можно выразить изменение проводимости при изменении температуры:

$$\Delta \ln \sigma_i = -\frac{\Delta E_0}{2k} \Delta \left( \frac{1}{T} \right), \quad (1.21)$$

где  $\Delta \ln \sigma_i = \ln \sigma_2 - \ln \sigma_1 = \ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ ;

$$k = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}.$$

Ширина запрещенной зоны рассчитывается по формуле

$$\Delta E_0 = -\frac{2k\Delta \ln \sigma_i}{\Delta \left( \frac{1}{T} \right)}. \quad (1.22)$$

Саму электропроводность можно выразить из формулы (1.14):

$$\sigma_i = \frac{Il}{US}. \quad (1.23)$$

Таким образом, экспериментально измерив электропроводность, постоянную Холла и их зависимость от температуры, можно определить ширину запрещенной зоны полупроводника, тип носителей заряда и установить зависимости концентрации и подвижности носителей заряда от температуры.

Магнитное поле в образце создается электромагнитом. При измерении ЭДС Холла держатель с образцом полупроводника помещают между полюсами магнита, пропускают через него ток и измеряют возникающую разность потенциалов.

При экспериментальном определении ЭДС Холла следует обратить внимание, что наряду с эффектом Холла имеют место также некоторые другие

эффекты: гальваномагнитный эффект, термомагнитный эффект и др. Для исключения влияния этих побочных эффектов используют свойство их четности, т. е. их независимости от направления линий магнитного поля. Между тем эффект Холла, являясь нечетным эффектом, меняет свой знак при изменении направления линий магнитного поля.

Для большей точности измерения следует выполнять при двух противоположных направлениях линий магнитного поля (при исследовании зависимости от магнитной индукции) и направлениях тока (при исследовании зависимости от силы тока) в полупроводнике, что необходимо для исключения возможной ошибки.

Тогда полученные при разных направлениях линий магнитного поля значения разности потенциалов Холла рассчитываются по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}, \quad (1.24)$$

где  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  – значения, полученные из двух измерений при взаимно противоположном направлении линий магнитного поля (тока) по отношению к образцу.

В формуле (1.14) не учитывается сопротивление подводящих ток проводов и переходное сопротивление контактов образцу. Это допустимо, если эти сопротивления малы, однако малое переходное сопротивление контактов обеспечить непросто, если речь идет о контактах с полупроводниковыми материалами. Так как вольтметр измеряет суммарное падение напряжения на образце и на контактах, то определить сопротивление только образца, без контактов, в таком случае невозможно. Избавиться от ошибки, вносимой падением напряжения на токовых контактах, можно, подсоединив вольтметр не ко всему образцу, а к его части. При этом в формуле (1.14) длину образца следует заменить на расстояние между измерительными контактами.

## 1.2. Оборудование и материалы

Для определения электрофизических свойств полупроводников по измерениям эффекта Холла применяется учебный лабораторный стенд, внешний вид которого представлен на рис. 1.3.

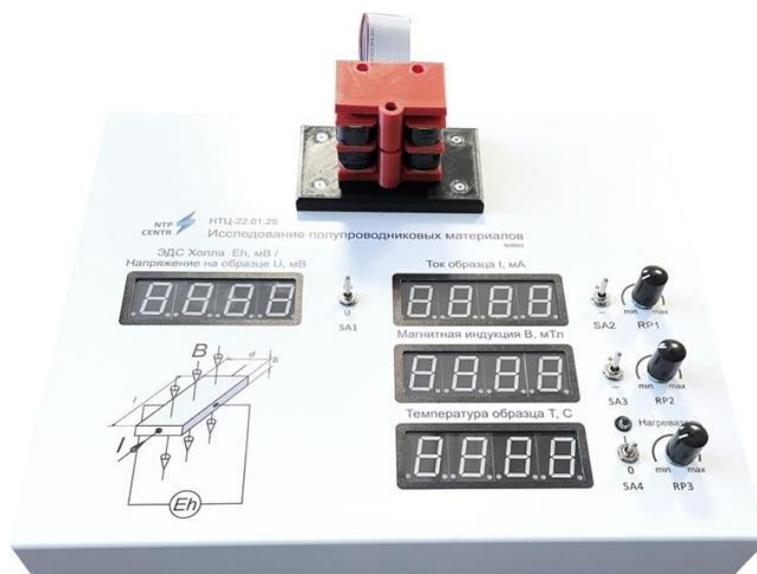


Рис. 1.3. Внешний вид стенда

Конструктивно стенд состоит из блока управления, содержащего все необходимые для проведения лабораторных работ электронные устройства.

На панели блока управления размещены:

- соленоид;
- цифровые индикаторы измеряемого тока через образец из полупроводникового материала, индукции магнитного поля в зазоре магнитопровода соленоида, температуры образца и наведенной ЭДС Холла;
- регуляторы и переключатели полярности тока через образец и индукции магнитного поля;
- выключатель нагревателя;
- регулятор температуры.

На задней стороне блока управления размещен силовой шнур, предохранитель, гнездо *USB* для подключения системы измерений к ПК.

В сердечник соленоида помещен образец с нагревательным элементом и датчиком температуры.

Ток в образце и температура образца стабилизируются на заданном уровне. Для индукции магнитного поля и тока через образец предусмотрена возможность быстрой смены направления при сохранении модуля.

### 1.3. Порядок выполнения работы

Перед использованием стенда выполнить следующие действия:

- регуляторы *RP1–RP3* повернуть до упора против часовой стрелки, тумблер *SA4* перевести в положение «0»;
- тумблер *SA1* перевести в положение «*Eh*»;
- включить питание стенда клавишным переключателем, расположенным на задней стороне стенда.

### 1.3.1. Определение зависимости ЭДС Холла от индукции магнитного поля

Исследования проводить в следующей последовательности.

1. Тумблером *SA2* установить знак, а регулятором *RP1* – величину тока, проходящего через образец, по указанию преподавателя (–5...5 мА). Записать показания ЭДС Холла  $\varphi_1$  (без включения электромагнита) в табл. 1.1.

2. Тумблер *SA3* перевести в положение «+», регулятором *RP2* установить величину индукции магнитного поля, действующего на образец, равную 5 мТл. Записать показания ЭДС Холла  $\varphi_2$  в табл. 1.1.

3. Тумблер *SA3* перевести в положение «–», при необходимости регулятором *RP2* подкорректировать величину индукции магнитного поля, действующего на образец, так, чтобы она оказалась такой же, как и в п. 2.

4. Тумблер *SA2* перевести в положение «–», при необходимости регулятором *RP1* подкорректировать величину тока через образец.

5. Записать показания ЭДС Холла в табл. 1.1.

6. Рассчитать среднее значение ЭДС Холла  $\bar{\varphi} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$ , полученное в пп. 2, 3. Полученные данные занести в табл. 1.1.

7. Изменяя величину магнитного поля с шагом 2 мТл, провести измерения повторно согласно пп. 2–5.

8. Регуляторы *RP1–RP3* повернуть до упора против часовой стрелки, выключить питание стенда клавишным переключателем, расположенным на задней стенке.

9. Построить график.

10. По формуле (1.4) найти постоянную Холла *R*. При расчете принять  $d = 0,5$  мм. Оценить погрешность определения постоянной Холла.

11. При необходимости выполнить подготовку стенда к работе (см. подразд. 1.3) и повторить пп. 1–6 для другого значения тока через образец.

Таблица 1.1

Результаты измерений и вычислений

<i>I</i> , мА	<i>B</i> , мТл	$\varphi_1$ , мВ	$\varphi_2$ , мВ	$\bar{\varphi}$ , мВ	$R \pm \Delta R$ , м <sup>3</sup> /(А·с)

### 1.3.2. Определение зависимости ЭДС Холла от тока образца

Исследования проводить в следующей последовательности.

1. Убедиться в том, что регуляторы *RP1–RP3* повернуты до упора против часовой стрелки, тумблер *SA4* находится в положении «0».

2. Тумблер *SA1* перевести в положение «*Eh*».

3. Включить питание стенда клавишным переключателем, расположенным на задней стороне стенда.

4. Тумблером *SA3* установить знак, а регулятором *RP2* – величину индукции магнитного поля, действующего на образец, по указанию преподавателя (–35...+35 мТл).

5. Записать показания ЭДС Холла без включения тока через образец.

6. Тумблер *SA2* перевести в положение «+», регулятором *RP1* установить величину тока через образец равной 0,5 мА. Записать показания ЭДС Холла  $\varphi_1$  в табл. 1.2.

7. Тумблер *SA2* перевести в положение «–», при необходимости регулятором *RP1* подкорректировать величину тока через образец так, чтобы он оказался таким же, как и в п. 6. Записать показания ЭДС Холла  $\varphi_2$  в табл. 1.2.

8. Найти среднее значение ЭДС Холла, полученное в пп. 6–7, по формуле

$$\bar{\varphi} = \frac{|\varphi_1| + |\varphi_2|}{2}. \quad (1.24)$$

9. Полученные данные занести в табл. 1.2.

10. Изменяя величину тока через образец с шагом 0,5 мА, провести измерения повторно, согласно пп. 4–9.

11. Регуляторы *RP1–RP3* повернуть до упора против часовой стрелки, выключить питание стенда клавишным переключателем, расположенным на задней стороне стенда.

12. Построить график  $\Delta\varphi = f(I)$ .

13. По формуле (1.4) найти постоянную Холла. При расчете принять  $d = 0,5$  мм. Оценить погрешность определения постоянной Холла.

14. При необходимости повторить пп. 1–10 для другого значения индукции магнитного поля.

Таблица 1.2

Результаты измерений и вычислений

$I$ , мА	$B$ , мТл	$\varphi_1$ , мВ	$\varphi_2$ , мВ	$\bar{\varphi}$ , мВ	$R \pm \Delta R$ , м <sup>3</sup> /(А·с)

### 1.3.3. Определение типа носителей заряда и ширины запрещенной зоны полупроводникового материала

Исследования проводить в следующей последовательности.

1. Тумблером *SA2* установить знак, а регулятором *RP1* – величину тока через образец по указанию преподавателя (–5...+5 мА). Тумблером *SA3* установить знак, а регулятором *RP2* – величину индукции магнитного поля, действующего на образец, по указанию преподавателя (–35...+35 мТл).

2. Тумблер *SA1* перевести в положение «U». Записать значение напряжения на образце  $U$  в табл. 1.3.

3. Тумблер *SA1* перевести в положение «*Eh*». Записать показания ЭДС Холла *Eh* в табл. 1.3.

4. Тумблер *SA4* перевести в положение «1». Регулятором *RP3* установить температуру образца 35 °С. Повторить пп. 2, 3.

5. Изменяя температуру образца до 70 °С с шагом 5°С, повторить пп. 2, 3.

6. Регуляторы *RP1...RP3* повернуть до упора против часовой стрелки. Тумблер *SA4* перевести в положение «0». Включить питание стенда клавишным переключателем, расположенным на задней стороне стенда.

7. Принять для дальнейших расчетов  $d = 0,1$  мм,  $b = 2,5$  мм,  $l = 2,5$  мм.

8. Рассчитать электропроводность образца для каждого значения температуры по формуле

$$\sigma_i = \frac{Il}{US}. \quad (1.25)$$

9. По формулам (1.4) и (1.10) найти концентрацию основных носителей заряда для каждого значения температуры.

10. По формулам (1.13) и (1.14) найти подвижность основных носителей заряда для каждого значения температуры.

Таблица 1.3

Результаты измерений и вычислений

<i>I</i> , мА	<i>B</i> , мТл	<i>Eh</i> , мВ	<i>U</i> , мВ	<i>t</i> , °С	$\sigma$ , См	$R \pm \Delta R$ , м <sup>3</sup> /(А·с)	<i>n</i> , м <sup>-3</sup>	$\mu$ , м <sup>2</sup> /(В·с)

### 1.3.4. Определение типа носителей заряда и ширины запрещенной зоны полупроводникового материала при $U = \text{const}$

Исследования проводить в следующей последовательности.

1. Тумблер *SA1* перевести в положение «*U*».

2. Тумблером *SA2* установить знак, а регулятором *RP1* – величину напряжения на образце по указанию преподавателя (–4500...4500 мВ).

3. Тумблером *SA3* установить знак, а регулятором *RP2* – величину индукции магнитного поля, действующего на образец, по указанию преподавателя (–35...+35 мТл).

4. Записать значение тока на образце *I* в табл. 1.4.

5. Тумблер *SA1* перевести в положение «*Eh*». Записать показания ЭДС Холла в табл. 1.4.

6. Тумблер SA4 перевести в положение «1». Регулятором RP3 установить температуру образца 35 °С. Повторить пп. 1–4, корректируя регулятором RP1 величину напряжения на образце до первоначально заданной.

7. Изменяя температуру образца до 70 °С с шагом 5 °С, повторить пп. 2, 3.

8. Регуляторы RP1–RP3 повернуть до упора против часовой стрелки. Тумблер SA4 перевести в положение «0». Выключить питание стенда клавишным переключателем, расположенным на задней стороне стенда.

9. Принять для дальнейших расчетов  $d = 0,1$  мм,  $b = 2,5$  мм,  $l = 2,5$  мм.

10. Рассчитать электропроводность образца для каждого значения температуры по формуле (1.25).

11. По формулам (1.4) и (1.10) найти концентрацию основных носителей заряда для каждого значения температуры.

12. По формулам (1.13) и (1.14) найти подвижность основных носителей заряда для каждого значения температуры.

Таблица 1.4

Результаты измерений и вычислений

$I$ , мА	$V$ , мТл	$Eh$ , мВ	$U$ , мВ	$t$ , °С	$\sigma$ , См	$R \pm \Delta R$ , м <sup>3</sup> /(А·с)	$n$ , м <sup>-3</sup>	$\mu$ , м <sup>2</sup> /(В·с)

Порядок завершения работы:

- регуляторы RP1–RP3 повернуть до упора против часовой стрелки;
- выключить питание стенда клавишным переключателем, расположенным на задней стороне стенда.

#### 1.4. Содержание отчета

1. Цели работы.
2. Краткие теоретические сведения и методики измерений, основные расчетные формулы.
3. Результаты измерений и вычислений.
4. Выводы.

#### 1.5. Контрольные вопросы

1. Объяснить сущность эффекта Холла.
2. Как определить величину и направление силы Лоренца?
3. От чего зависит знак постоянной Холла?

4. Почему постоянная Холла в полупроводнике значительно больше, чем в металлах?
5. Что такое классический эффект Холла?
6. Записать выражение для силы Лоренца, действующей на носители заряда (в векторном виде). Определить направление силы Лоренца для двух разных направлений тока  $I$  и индукции магнитного поля  $\vec{B}$ .
7. Как постоянная Холла связана с подвижностью носителей заряда и удельной проводимостью вещества полупроводника?
8. Вывести основное выражение для ЭДС Холла. Написать выражение для постоянной Холла и рассказать, как ее экспериментально определяют.
9. Что понимают под скоростью дрейфа носителей заряда?
10. Что называют подвижностью носителей заряда?
11. Как вычисляется концентрация носителей тока?
12. Определить понятие «подвижность носителей тока». Как связана подвижность носителей тока с электропроводностью вещества? Как определяется подвижность носителей тока?
13. Какие типы проводимости имеют место в полупроводниках?
14. Как постоянная Холла связана с подвижностью носителей заряда и удельной проводимостью вещества полупроводника?

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

**Цель работы:** изучение механизмов пробоя газообразных, жидких и твердых диэлектриков, влияния внешних факторов, частоты и распределения электрического поля на электрическую прочность диэлектриков, получение навыков определения электрической прочности твердых диэлектриков, исследование зависимости электрической прочности от толщины материала, количества изолирующих слоев и формы электродов.

#### 2.1. Краткие теоретические сведения

Диэлектрик, находясь в электрическом поле, может потерять свойства изоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение. Явление образования проводящего канала в диэлектрике под действием электрического поля называют пробоем.

Минимальное приложенное к диэлектрику напряжение, приводящее к его пробую, называется пробивным напряжением  $U_{пр}$ .

Предпробойное состояние диэлектрика характеризуется резким возрастанием тока (рис. 2.1). Формально за пробивное принимают такое напряжение, при котором  $dI - dU = \infty$ , т. е. дифференциальная проводимость становится бесконечно большой.

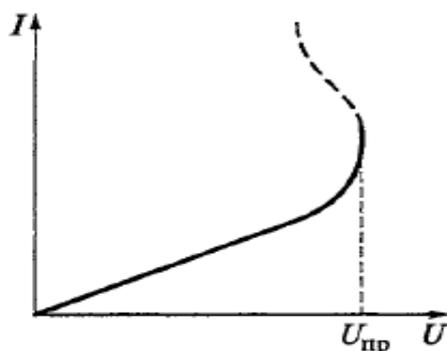


Рис. 2.1. Изменение тока при пробое диэлектрика

Значение пробивного напряжения зависит от вида и толщины диэлектрика, а также формы электрического поля, обусловленной конфигурацией электродов. Поэтому оно характеризует не столько свойства материала, сколько способность конкретного образца противостоять сильному электрическому полю. Более удобной характеристикой является электрическая прочность – минимальная напряженность однородного электрического поля, приводящая к пробую диэлектрика:  $E_{пр} = U_{пр} / h$ .

Отношение пробивного напряжения к номинальному рабочему напряжению называют коэффициентом запаса по электрической прочности. Пробивное напряжение возрастает также при импульсном воздействии электрического поля. Отношение импульсного пробивного напряжения к его статическому значению называют коэффициентом импульса.

Если пробой произошел в газообразном диэлектрике, то пробитый участок после снятия напряжения восстанавливает свою электрическую прочность. Пробой твердых диэлектриков при его полном развитии заканчивается разрушением изоляции. Жидкие диэлектрики также обладают способностью к частичному восстановлению электрической прочности.

Пробой диэлектриков может возникать в результате электрических, тепловых и электрохимических процессов, обусловленных действием электрического поля.

**Пробой газов.** Обычно физические процессы в воздухе протекают при нормальном атмосферном давлении. Однако при создании целого ряда электронных приборов приходится встречаться со свойствами воздуха и других газов в разреженном состоянии или при повышенных давлениях.

Пробивная напряженность  $E_{пр}$  воздуха в нормальных условиях невелика по сравнению с большинством жидких и твердых диэлектриков.

В газе всегда имеются свободные ионы и электроны, которые при наложении внешнего поля получают добавочную скорость. В процессе направленного движения к электродам они сталкиваются с атомами или молекулами газа и передают им свою энергию. Добавочная кинетическая энергия, которую получают заряды под действием поля напряженностью  $E$ :

$$W = q \cdot E \cdot l, \quad (2.1)$$

где  $l$  – средняя длина свободного пробега частиц.

Если напряженность поля достаточно велика, то начинается ударная ионизация – в результате столкновений частиц происходит расщепление молекул на электроны и положительно заряженные ионы. Условием развития ударной ионизации является выполнение неравенства

$$q \cdot E \cdot l \geq E_{и}, \quad (2.2)$$

где  $E_{и}$  – энергия ионизации атомов или молекул газа, может принимать значения от 4 до 25 эВ.

Ударная ионизация производится главным образом электронами, поскольку электроны благодаря меньшей массе обладают в сотни раз большей подвижностью, проходят за одинаковое время значительно большее расстояние и, соответственно, произведут больше ионизаций. Ударная ионизация вызывает лавинообразное размножение заряженных частиц. Лавина распространяется к аноду со скоростью около  $10^5$ /с и вблизи анода достигает своего наибольшего развития. Как правило, время формирования лавинного пробоя составляет  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  с.

Такой пробой возникает при малом расстоянии между электродами  $h$  или при пониженном давлении газа  $p$ , когда мало общее число молекул в разрядном промежутке. При больших значениях  $ph$  пробой в газах носит лавинно-стримерный характер (рис. 2.2).

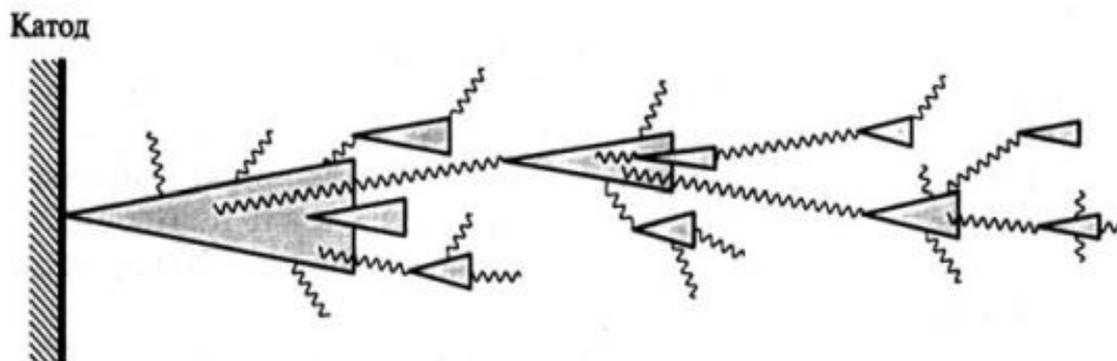


Рис. 2.2. Схема развития отрицательного стримера: электронные лавины – заштрихованные конусы; траектории фотонов – волнистые линии

Под стримером понимают область скопления заряженных частиц, которая по степени ионизации существенно превосходит прилегающие области межэлектродного пространства. Образованию электронных лавин, из которых формируется отрицательный стример, способствует фотоионизация атомов фотонами, образующимися при ударном возбуждении электронов внутренних оболочек.

**Пробой твердых диэлектриков** может происходить как при высоких, так и при низких напряжениях, например в микросхемах, где для изоляции элементов используют диэлектрические пленки толщиной 50–100 нм.

В развитии пробоя твердых диэлектриков принято выделять предварительную (начальную) и завершающую стадии. На предварительной стадии происходит нарушение стационарного режима электропроводности, приводящее к потере диэлектриком электрической прочности и резкому возрастанию тока. Завершающую стадию связывают с образованием проводящего канала и последующим разрушением материала. Вторую стадию пробоя можно предупредить, если ограничить нарастание тока в разрядной цепи. По природе процессов, определяющих развитие подготовительной стадии, различают три основных механизма пробоя:

- электрический;
- тепловой;
- электрохимический.

Каждый из выделенных механизмов пробоя может иметь место в одном и том же диэлектрике в зависимости от характера приложенного напряжения – постоянного или переменного, низкочастотного, высокочастотного или импульсного, а также от длительности воздействия поля, степени однородности и дефектности диэлектрика, его толщины, наличия в нем

закрытых пор, условий охлаждения материала и др. Электрический пробой твердых диэлектриков является чисто электронным процессом, в котором основную роль играет ударная ионизация. Начальные электроны появляются в результате их инжекции с металлических электродов в зону проводимости или вследствие стимулированного полем освобождения носителей заряда с ловушек.

Ударная ионизация начинается в том случае, когда ускоренные электроны приобретают от поля энергию, превышающую ширину запрещенной зоны. Тогда при взаимодействии первичных электронов с узлами решетки образуются вторичные электроны путем перевода последних из валентной зоны в зону проводимости. При каждом акте ионизации вместо одного ускоренного полем электрона, образуется два медленных электрона, которые затем также разгоняются полем и вновь производят ионизацию. В результате формируется электронная лавина.

При сильном развитии лавин у анода после ухода электронов остается объемный положительный заряд достаточно большой плотности. Благодаря ему начинается формирование встречного стримера, прорастающего к аноду с участием процессов фотоионизации. Потеря материалом электрической прочности при такой последовательности процессов происходит за время порядка  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  с. Предварительная стадия пробоя завершается образованием тонких ( $\approx 1$  нм) проводящих каналов. Плотность тока в этих каналах может достигать  $10^9$  А/м<sup>2</sup>. На завершающей стадии происходит плавление диэлектрика в канале. Возникающее при этом давление может привести к появлению трещин или полному разрушению материала.

Рассмотренный механизм пробоя во многом аналогичен лавинно-стримерному пробоям газов. Он характерен для объемных образцов толщиной  $h > 100$  мкм. В этом случае пробивная напряженность в однородном поле практически не зависит от толщины диэлектрика. Однако тонкие пленки толщиной менее 1 мкм обладают более высокой электрической прочностью. Это свойство получило название электрического упрочнения материалов.

В тонких пленках изменяется механизм электрического пробоя. Одна электронная лавина при малой длине разрядного промежутка не может создать у анода достаточно мощный положительный заряд, который способен инициировать формирование встречного стримера. Вместе с тем такой объемный заряд могут образовать несколько последовательных лавин, развивающихся в одной и той же области пленки. То есть лавинно-стримерный пробой превращается в многолавиный, как в случае газов при малых значениях  $ph$ . Чтобы электронные лавины в тонких слоях приобрели достаточную мощность, необходимо увеличивать напряженность поля. Пробивная напряженность высококачественных тонких диэлектрических пленок может достигать  $10^{10}$  В/м. В качестве примера на рис. 2.3 приведены экспериментальные данные по электрической прочности аморфных пленок SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, используемых в структурах МДП (МОП).

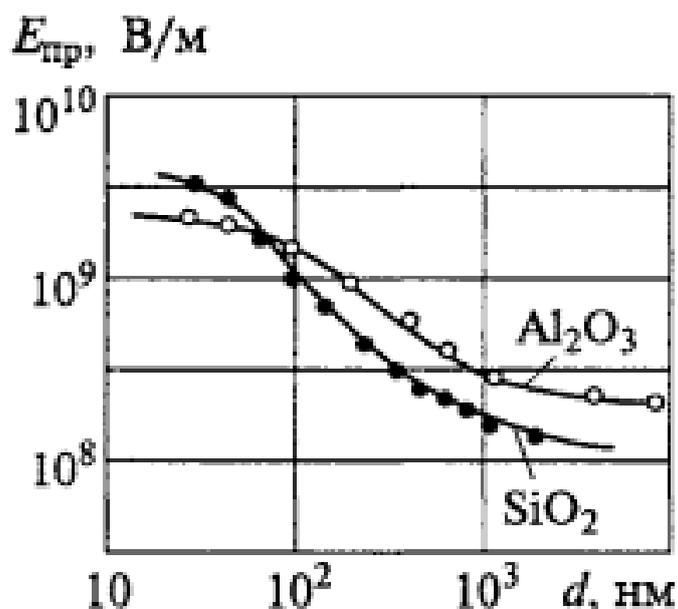


Рис. 2.3. Зависимость электрической прочности от толщины пленок

Чисто электрический пробой имеет место в тех случаях, когда исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, обуславливающих нагрев диэлектрика, а также отсутствует ионизация газовых включений. Характерные признаки электрического пробоя:

- перед пробоем доминирует электронная проводимость и наблюдается нарушение закона Ома в сторону более резкого возрастания тока;
- пробивная напряженность различных твердых диэлектриков изменяется в сравнительно узких пределах (от  $10^8$  до  $10^9$  В/м);
- значение  $E_{пр}$  для данного диэлектрика при электрическом пробое намного выше, чем при других видах пробоя;
- электрическая прочность материала возрастает с температурой, что можно объяснить уменьшением длины свободного пробега электронов;
- значения  $E_{пр}$  не зависят от длительности воздействия напряжения и частоты поля (по крайней мере, до частот  $10^6$  Гц);
- электрический пробой наблюдается у большинства диэлектриков при импульсном воздействии напряжения, так как за короткое время не успевают развиваться ни тепловые, ни электрохимические процессы.

Тепловой пробой характерен только для твердых диэлектриков и обусловлен нарушением в них теплового равновесия. Если количество тепла, выделяющегося в диэлектрике за счет диэлектрических потерь, превысит количество теплоты, отводимой в окружающее пространство, то начнется разогрев изолятора до полной потери им электрической прочности. Тепловой пробой по сравнению с электрическим характеризуется меньшим значением  $E_{пр}$  и существенно большей длительностью предварительной стадии.

Интенсивность теплоотвода во многом зависит от формы и габаритных размеров диэлектрика, а также условий его эксплуатации. Поэтому пробивная напряженность при тепловом пробое в большей мере характеризует свойства

конкретного изделия, чем материала, из которого оно изготовлено. Для теплового пробоя характерно уменьшение  $U_{пр}$  с ростом температуры окружающей среды, а также снижение электрической прочности с увеличением времени выдержки диэлектрика в электрическом поле и увеличением толщины изолятора.

Электрохимический пробой обусловлен химическими реакциями, протекающими под действием электрического поля в объеме и на поверхности твердого диэлектрика, приводящими к необратимому ухудшению его свойств. Это явление принято называть электрическим старением материала. Одной из основных причин электрического старения является ионная электропроводность, которая связана с переносом массы и приводит к постепенному изменению химического состава вещества. При электрохимическом пробое электрическая прочность диэлектриков оказывается существенно меньше, чем при тепловом, а тем более при электрическом пробое. Именно эта форма пробоя во многих случаях определяет надежность электрической изоляции.

Время развития электрохимического пробоя называется временем жизни диэлектрика. Оно может составлять от десятков минут до многих месяцев и тем меньше, чем больше величина приложенного напряжения. Электрическое старение особенно заметно при воздействии постоянного напряжения и в меньшей степени проявляется в переменных полях. Время жизни диэлектриков экспоненциально уменьшается с ростом температуры. Электрическому старению подвержены как органические, так и неорганические диэлектрики, хотя механизмы старения этих материалов существенно различаются.

Так, необратимые явления в керамике на основе  $TiO_2$ ,  $CaTiO_3$ ,  $SrTiO_3$  и др. связывают с восстановительными процессами, которые инициируются постоянным электрическим полем. Атомы кислорода выходят из узлов кристаллической решетки на поверхность твердой фазы, в результате чего образуются анионные вакансии. Такой переход наиболее вероятен вблизи всякого рода дефектов – трещин, пор, границ зерен. Анионные вакансии захватывают электроны и становятся донорными центрами. В результате резко увеличивается электронная проводимость материала, которая способствует его прогрессирующему разогреву.

В органических полимерах старение происходит главным образом в переменных полях за счет частичных разрядов в газовых включениях, которые являются распространенным видом дефектов высоковольтной полимерной изоляции.

**Под поверхностным пробоем** понимают пробой газа или жидкости вблизи поверхности твердого диэлектрика. В случае поверхностного пробоя электрическая прочность диэлектрика не нарушается, однако образование проводящего канала на поверхности существенно ограничивает рабочие напряжения изолятора. Значение напряжения поверхностного пробоя во многом определяется конфигурацией электродов, габаритами и формой

твёрдого диэлектрика. Если изолятор эксплуатируется на воздухе, то оно зависит от давления, температуры, относительной влажности воздуха, частоты электрического поля. Чем резче выражены гидрофильные свойства диэлектрика, тем сильнее падает поверхностное пробивное напряжение в условиях повышенной влажности. Влияние влажности воздуха на пробивное напряжение слабо сказывается в радиочастотном диапазоне, когда поверхность диэлектрика подсушивается благодаря повышенным диэлектрическим потерям в адсорбированной пленке.

Для предотвращения поверхностного пробоя увеличивают длину разрядного пути вдоль поверхности диэлектрика за счет создания ребристой (гофрированной) поверхности изоляторов, проточки канавок, изготовления конструкций с утопленными электродами. Повышение рабочих напряжений достигается также сглаживанием неоднородностей электрического поля путем изменения формы электродов, оптимизации конструкции изолятора, нанесения на его поверхность покрытий или пленок с повышенной диэлектрической прочностью.

## 2.2. Оборудование и материалы

Для определения зависимости электрической прочности твердых диэлектриков от состава, строения и толщины плоских образцов, числа слоев материала, формы электродов используется лабораторный стенд. Он включает установку для испытаний (рис. 2.4), блок управления (рис. 2.5), мультиметр, микрометр.

Образец размещается на неподвижном плоском электроде 1 установки для испытаний, на который подается положительный испытательный потенциал. Сверху он фиксируется одним из четырех подвижных (сменных) электродов 2, расположенных на механизме револьверного типа 3.

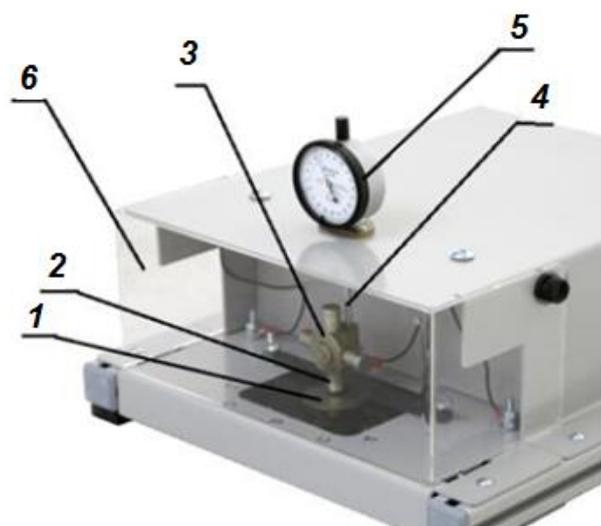


Рис. 2.4. Установка для испытаний на электрическую прочность

Форма сменных электродов (цилиндрический, сферический, полусферический, конус  $120^\circ$ ) позволяет проводить испытания в электрических полях различной конфигурации. Электроды соединены с корпусом (общим проводом) установки. Механизм смены электродов жестко закреплен на штоке 4 микрометра часового типа 5, позволяющего измерить толщину образца при его установке на электроде 1. Шток перемещается по вертикали для укладки образцов и при смене электрода.

Рабочая область установки закрывается прозрачной защитной крышкой 6, снабженной концевыми выключателями, что предотвращает доступ в зону измерений при включенном высоком напряжении.



Рис. 2.5. Блок управления стенда

На передней панели блока управления (см. рис. 2.5) расположены: кнопка включения высокого напряжения 1, регулятор напряжения «Грубо» 2, регулятор «Точно» настройки напряжения 3, цифровой индикатор выходного напряжения 4. На задней панели блока измерения расположены кнопки включения питания и соединительные шнуры с установкой для испытаний.

*Технические характеристики стенда:*

- род тока – переменный;
- максимальное испытательное напряжение – 20 кВ;
- минимальное испытательное напряжение – до 1,0 кВ;
- коэффициент делителя в измерителе – 1000 : 1;
- погрешность делителя –  $\pm 2\%$ ;
- диаметр неподвижного электрода – 25 мм;
- диаметр сменных электродов – 12 мм;
- время испытания при напряжении свыше 15 кВ –  $\leq 5$  с;
- перерыв между испытаниями – не менее 10 с.

Установка предназначена для кратковременных испытаний образцов на электрическую прочность до пробоя. В качестве образцов предполагается использование тонких непроводящих материалов (пленки, ленты, пластины, электротехническая и обычная бумага и пр.).

## **2.3. Порядок выполнения работы**

В лабораторной работе определяется электрическая прочность твердых диэлектриков на переменном токе (частота 50 Гц). Измерение зависимости электрической прочности твердых диэлектриков от состава, строения и толщины плоских диэлектрических образцов, числа слоев материала, формы электродов.

### **2.3.1. Подготовка лабораторного стенда к работе**

1. Перевести регуляторы напряжения 2 и 3 (см. рис. 2.5) в крайнее левое положение, соответствующее минимальному напряжению.

2. На подвижном стержне 4 измерительной головки установки для испытаний выбрать нужный электрод 2 путем вращения механизма 3.

3. Опустить выбранный электрод до касания нижнего неподвижного электрода 1.

4. Произвести установку «0» головки микрометра путем вращения индикационного кольца.

5. Включить шнур питания в сеть, перевести выключатель блока измерения в положение «Включено». При этом должен светиться индикатор выходного напряжения 4 и показывать нули во всех цифровых разрядах.

6. Проверить работу блокировки установки для испытаний защитным щитком, для чего поднять его вверх. Индикаторы выходного напряжения должны погаснуть. Опустите щиток вниз – индикаторы должны засветиться.

7. Образцы для испытания должны быть такими, чтобы расстояние между точкой пробоя и краем образца или соседними точками пробоя было не менее 40 мм. Для исследования зависимости напряжения пробоя от толщины подготовьте образцы одного материала разной толщины. Для исследования зависимости напряжения пробоя от количества слоев диэлектрика можно использовать образцы скотча, склеенные в 1–10 слоев.

### **2.3.2. Определение электрической прочности твердых диэлектриков**

Выполнить следующие действия.

1. Измерить микрометром (или другим способом) толщину образца (образцов). Данные занести в табл. 2.1.

2. Убедиться, что SA1 выключен и регуляторы напряжения установлены в крайнее левое положение.

3. Перевести выключатель в положение «Включено».

4. Открыть крышку рабочей области. Поместить образец между электродами (см. п. 2.3.1), при этом установить требуемый электрод так, чтобы он не перекосялся после опускания на образец. Также следить за расположением образца.

5. Закрыть крышку, контролируя срабатывание выключателей.
6. Включить высокое напряжение кнопкой 1 (см. рис. 2.5).
7. Плавно увеличивать напряжение регулятором «Грубо», величину выходного напряжения контролировать по мультиметру.
8. В момент пробоя измеряемое напряжение обнуляется. Пробой сопровождается характерным звуком. За напряжение пробоя принять последнюю зафиксированную по мультиметру величину напряжения.
9. После пробоя образца незамедлительно выключить SA1. Регуляторы напряжения установить в крайнее левое положение. Величину напряжения занести в табл. 2.1.
10. Если напряжение на образце достигло максимальной величины, но пробой не происходит на протяжении 5 с – считать, что образец выдержал испытание данным напряжением. Для определения электрической прочности материала использовать образцы меньшей толщины.
11. Для более точного определения напряжения пробоя при повторных испытаниях более плавно поднимать напряжение, делать паузы после подъема на каждый следующий 1 кВ, а также использовать регулятор «Точно» вблизи величины предполагаемого напряжения пробоя.
12. Повторить пп. 1–11 для остальных образцов из серии.
13. Отключить сетевой выключатель.
14. Используя полученные данные вычислить среднее значение толщины образцов  $h_{CP}$ . Значение занести в табл. 2.1.
15. Используя полученные данные вычислить среднее значение напряжения пробоя  $U_{ПР\_CP}$ . Значение занести в табл. 2.1.
16. Рассчитать электрическую прочность материала образцов. Значение занести в табл. 2.1.
17. Повторить (если необходимо) опыты для электродов с другой формой. Результаты опытов отразить в табл. 2.2.
18. Повторить опыты для других образцов (материалов).

Таблица 2.1

Результаты измерений и вычислений

Толщина образца	Толщина образца средняя	Напряжение пробоя	Напряжение пробоя среднее	Электрическая прочность
$h$ , мм	$h_{CP}$ , мм	$U_{ПР}$ , кВ	$U_{ПР\_CP}$ , кВ	$E_{ПР}$ , кВ/м

Электрическая прочность рассчитывается по формуле

$$E_{ПР} = \frac{U_{ПР\_CP}}{h_{CP}}. \quad (2.3)$$

## Результаты измерений и вычислений

Форма электрода	Толщина образца средняя	Напряжение пробоя	Напряжение пробоя среднее	Электрическая прочность
–	$h_{CP}$ , мм	$U_{ПР}$ , кВ	$U_{ПР\_CP}$ , кВ	$E_{ПР}$ , кВ/м
Цилиндр				
Сфера				
Полусфера				
Конус				

### 2.3.3. Исследование зависимости электрической прочности материала от толщины

Выполнить следующие действия.

1. Измерить микрометром (или другим способом) толщину образца (образцов). Данные занести в табл. 2.3.

2. Убедиться, что SA1 выключен и регуляторы напряжения установлены в крайнее левое положение.

3. Перевести выключатель в положение «Включено».

4. Открыть крышку рабочей области. Поместить образец между электродами (см. п. 2.3.1), установить требуемый электрод так, чтобы он не перекосялся после опускания на образец. Следить за расположением образца.

5. Закрыть крышку, контролируя срабатывание выключателей.

6. Включить высокое напряжение кнопкой 1 (см. рис. 2.5).

7. Плавно увеличивать напряжение регулятором «Грубо», величину выходного напряжения контролировать по мультиметру.

8. В момент пробоя измеряемое напряжение обнуляется. Пробой сопровождается характерным звуком. За напряжение пробоя принять последнюю зафиксированную по мультиметру величину напряжения.

9. После пробоя образца незамедлительно выключить SA1. Регуляторы напряжения установить в крайнее левое положение. Величину напряжения занести в табл. 2.3.

10. Если напряжение на образце достигло максимальной величины, но пробой не происходит на протяжении 5 с – считать, что образец выдержал испытание данным напряжением. Для определения электрической прочности материала использовать образцы меньшей толщины.

11. Для более точного определения напряжения пробоя при повторных испытаниях более плавно поднимать напряжение, делать паузы после подъема на каждый следующий 1 кВ, а также использовать регулятор «Точно» вблизи величины предполагаемого напряжения пробоя.

12. Повторить пп. 4–11 для всех образцов серии по возрастанию толщины.

13. Отключить сетевой выключатель.

14. Рассчитать электрическую прочность для всех испытанных образцов. Значения занести в табл. 2.3.

15. Построить графическую зависимость  $E_{\text{ПР}} = f(h)$ .

16. Обработать результаты эксперимента.

Таблица 2.3

Результаты измерений и вычислений

Толщина образца	Напряжение пробоя	Электрическая прочность
$h$ , мм	$U_{\text{ПР}}$ , кВ	$E_{\text{ПР}}$ , кВ/м

#### 2.3.4. Исследование зависимости электрической прочности листового материала от количества слоев

Исследования проводить в следующей последовательности.

1. Измерить микрометром толщину образца (образцов). Данные занести в табл. 2.4.

2. Убедиться, что SA1 выключен и регуляторы напряжения установлены в крайнее левое положение.

3. Перевести выключатель в положение «Включено».

4. Открыть крышку рабочей области. Поместить образец между электродами (см. п. 2.3.1), при этом установить требуемый электрод так, чтобы он не перекосялся после опускания на образец. Также следить за расположением образца.

5. Закрыть крышку, контролируя срабатывание выключателей.

6. Включить высокое напряжение кнопкой 1 (см. рис. 2.5).

7. Плавно увеличивать напряжение регулятором «Грубо», величину выходного напряжения контролировать по мультиметру.

8. В момент пробоя измеряемое напряжение обнуляется. Пробой сопровождается характерным звуком. За напряжение пробоя принять последнюю зафиксированную по мультиметру величину напряжения.

9. После пробоя образца незамедлительно выключить SA1. Регуляторы напряжения установить в крайнее левое положение. Величину напряжения занести в табл. 2.4.

10. Если напряжение на образце достигло максимальной величины, но пробой не происходит на протяжении 5 секунд – считать, что образец

выдержал испытание данным напряжением. Для определения электрической прочности материала использовать образцы меньшей толщины.

11. Для более точного определения напряжения пробоя при повторных испытаниях более плавно поднимать напряжение, делать паузы после подъема на каждый следующий 1 кВ, а также использовать регулятор «Точно» вблизи величины предполагаемого напряжения пробоя.

12. Повторить пп. 4–11, увеличивая количество слоев диэлектрика.

13. Повторить опыт наращивания количества слоев до необходимого уровня.

14. Отключить сетевой выключатель.

15. Рассчитать электрическую прочность для всех испытанных образцов.

Значения занести в табл. 2.4.

16. Построить графические зависимости  $E_{\text{ПР}} = f(n)$  и  $E_{\text{ПР}} = f(h)$ .

17. Обработать результаты эксперимента.

Таблица 2.4

Результаты измерений и вычислений

Количество слоев	Толщина суммы слоев	Напряжение пробоя	Электрическая прочность
$n$	$h$ , мм	$U_{\text{ПР}}$ , кВ	$E_{\text{ПР}}$ , кВ/м
1			
2			
...			

## 2.4. Содержание отчета

1. Цели работы.
2. Краткие теоретические сведения и методики измерений, основные расчетные формулы.
3. Результаты измерений и вычислений.
4. Выводы.

## 2.5. Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление электрического пробоя?
2. Что называется электрической прочностью?
3. Каковы причины пробоя диэлектриков?
4. Как пробивное напряжение диэлектрика связано с электрической прочностью?
5. Как неоднородность материала влияет на электрическую прочность?

6. Перечислить виды пробоя твердых диэлектриков и объясните их физическую сущность.

7. Какой диэлектрик имеет большую электрическую прочность – плотный или пористый? Почему?

8. От чего зависит главным образом электрическая прочность при электрической форме пробоя?

9. С чем связано снижение пробивного напряжения изоляции от времени?

10. При каких условиях возможен электротепловой (тепловой) пробой?

11. Какие факторы обуславливают снижение электрической прочности при тепловой форме пробоя?

12. Чем обусловлен электрохимический пробой?

13. Что представляет собой электротермический пробой?

14. Какие электроды используются для получения однородного поля?

15. Назвать характерные черты электрического и теплового пробоя.

16. Как зависит электрическая прочность  $E_{пр}$  от толщины диэлектрика, состоящего из тонких листов неоднородного материала?

17. Описать методику измерения пробивного напряжения.

18. Назвать причины «старения» диэлектрика в электрическом поле.

## Лабораторная работа № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Цель работы:** изучение основных видов механических испытаний материалов, формирование навыков проведения испытаний, определение прочностных свойств испытуемых материалов при растяжении и ударном изгибе.

#### 3.1. Краткие теоретические сведения

Многообразие условий службы и обработки материалов предполагает необходимость проведения различных механических испытаний. По характеру изменения нагрузки во времени они подразделяются на статические, динамические и циклические. Статические нагрузки относительно медленно нарастают во времени (обычно секунды – минуты). При динамическом нагружении это происходит за очень короткий промежуток времени (доли секунды). Циклические нагрузки характеризуются многократными изменениями по характеру (растяжение-сжатие, гиб-перегиб) и (или) по величине.

Из большого количества разновидностей статических испытаний, отличающихся схемой приложения нагрузок к образцу, наиболее распространены одноосное растяжение, одноосное сжатие, изгиб и кручение.

По результатам динамических испытаний определяют величину полной или удельной работы деформации, а также величину остаточной деформации образца (абсолютной или относительной). Динамические испытания чаще всего проводят по схеме изгиба. Испытания на усталость очень длительны по времени (часы – сотни часов). По их результатам определяют число циклов до разрушения при разных значениях напряжений, а в конечном итоге – то предельное напряжение, которое образец выдерживает без разрушения в течение определенного числа циклов нагружения.

##### 3.1.1. Испытания на статическое одноосное растяжение

Испытания на статическое одноосное растяжение (ГОСТ 1497–2023) – наиболее распространенный вид механических испытаний материалов, позволяющий определить их пластические и прочностные свойства, а также характеристики вязкости.

Механические свойства обычно определяют по первичным кривым растяжения в координатах: нагрузка ( $P$ ) – абсолютное удлинение ( $\Delta l$ ), которые автоматически записываются на диаграммной ленте испытательной машины.

Все многообразие этих кривых при низких температурах в первом приближении можно свести к трем типам (рис. 3.1).

Диаграмма растяжения (ДР) I типа характерна для образцов, разрушающихся без заметной пластической деформации (хрупкие материалы). ДР II типа получается при растяжении образцов, равномерно деформирующихся вплоть до разрушения. Наконец, ДР III типа характерна для образцов, разрушающихся после образования шейки в результате сосредоточенной деформации.

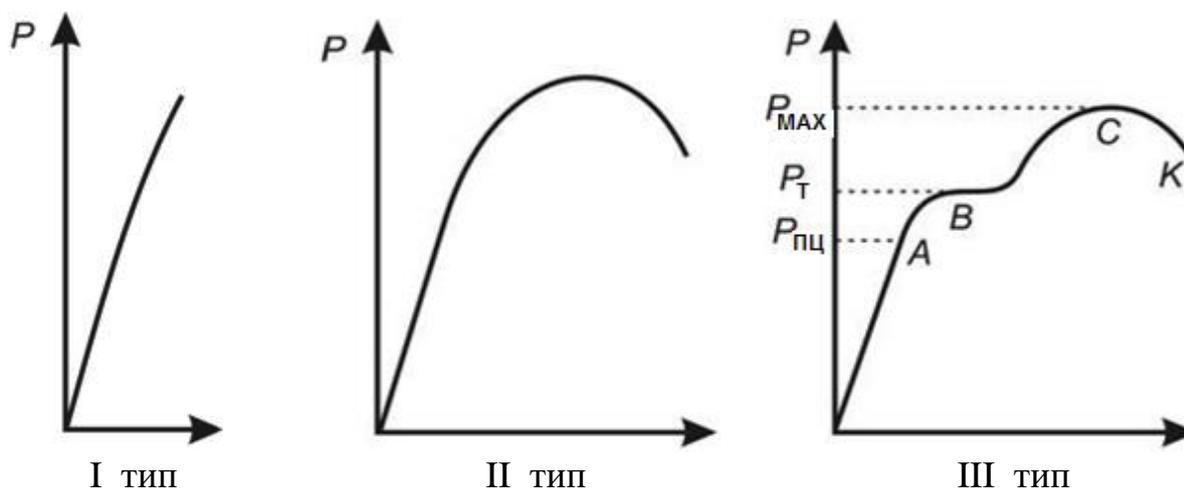


Рис. 3.1. Типы диаграмм растяжения

Увеличение длины образца в результате деформации обычно характеризуется относительным удлинением  $\delta$ , %:

$$\delta = \frac{(l_k - l_0)}{l_0} \cdot 100 \%, \quad (3.1)$$

где  $l_0$  и  $l_k$  – начальная и конечная длины.

Величина  $\delta$  является условной характеристикой, поскольку деформация с самого начала развивается на непрерывно меняющейся длине  $l$ , а отношение  $\frac{\Delta l}{l}$  лишено физического смысла. В связи с этим введено понятие истинного относительного удлинения  $e$ :

$$e = \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l_k}{l_0}\right). \quad (3.2)$$

Разница между  $\delta$  и  $e$  тем больше, чем больше степень деформации.

Уменьшение поперечного сечения образца при испытаниях на растяжение характеризуется величиной относительного сужения  $\psi$ , %:

$$\psi = \frac{(F_0 - F_k)}{F_0} \cdot 100 \%, \quad (3.3)$$

где  $F_0$  и  $F_k$  – начальная и конечная площади поперечного сечения образца.

Как и  $\delta$ , это условная характеристика деформации, ведь площадь сечения непрерывно меняется в процессе испытания.

Истинное относительное сужение  $\phi$  можно рассчитать как

$$\phi = \int_{F_0}^{F_k} \frac{dF}{F} = \ln\left(\frac{F_0}{F_k}\right). \quad (3.4)$$

Между  $e$ ,  $\delta$  и  $\phi$  существует функциональная связь в области равномерной деформации, т. е. пока величина относительных изменений размеров во всех точках рабочей части образца одинакова:

$$e = \ln\left(\frac{l_k}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{F_0}{F_k}\right) = \ln\left[\frac{1}{1-\phi}\right] = \ln(1 + \delta). \quad (3.5)$$

Последнее соотношение выведено из условия неизменности объема деформируемого материала.

### 3.1.2. Основные механические свойства

**Прочностные свойства** – это характеристики сопротивления материала образца деформации или разрушению. Поскольку величина усилия не может рассматриваться как характеристика материала, в практике используется понятие механического напряжения, представляющего собой усилие, отнесенное к площади поперечного сечения ( $\sigma_i = P_i/F_0$ ), которая однозначно определяет прочностные свойства материала. Большинство стандартных прочностных характеристик рассчитывают по положению определенных точек на ДР. На рис. 3.1 (ДР III типа) нанесены характерные точки, по ординатам которых рассчитывают прочностные характеристики.

На рис. 3.2 показана диаграмма растяжения металлов для условных (1) и истинных (2) напряжений. Кривая 1 характеризует поведение (деформацию) металла под действием напряжений  $\sigma$ , величина которых является условной ( $\sigma = P/F_0$ ), где  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения. До точки А деформация пропорциональна напряжению.

Тангенс угла наклона прямой  $OA$  к оси абсцисс называют модулем упругости материала  $E = \frac{\sigma}{\delta}$  (где  $\delta$  – относительная деформация). Он определяет жесткость материала, т. е. сопротивляемость металла упругой деформации, заключающейся в смещении атомов из положения равновесия в решетке. Модуль упругости тактически не зависит от структуры металла и определяется силами межатомной связи. Все другие механические свойства являются структурно чувствительными и изменяются в зависимости от структуры (обработки).

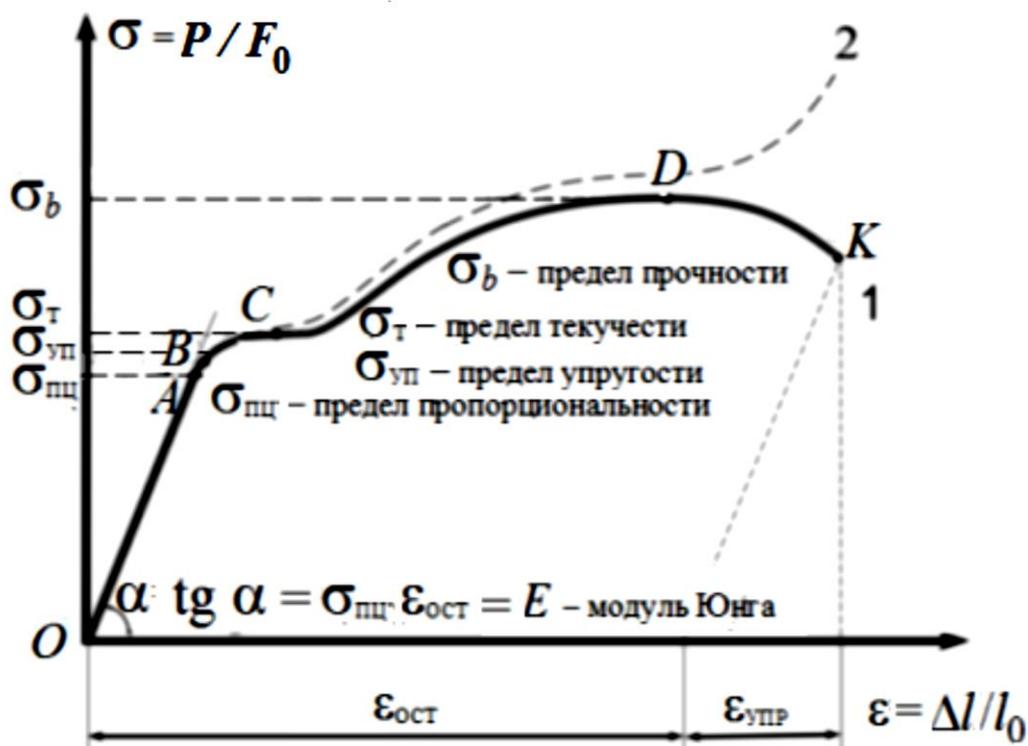


Рис. 3.2. Диаграмма растяжения металлов для условных (1) и истинных (2) напряжений:  $OA$  – область пропорциональности;  $AB$  – область упругости;  $BC$  – область текучести;  $CD$  – область упрочнения;  $DK$  – область разрушения

Закон пропорциональности между напряжением и деформацией является справедливым лишь в первом приближении. При точных измерениях даже при небольших напряжениях в упругой области наблюдаются отклонения от закона пропорциональности. Это явление называют неупругостью. Оно проявляется в том, что деформация, оставаясь обратимой, отстает по фазе от действующего напряжения. В связи с этим при нагрузке-разгрузке на диаграмме растяжения вместо прямой линии получается петля гистерезиса, так как линии нагрузки и разгрузки не совпадают между собой. Неупругость связана с движением точечных дефектов дислокации и атомов в приграничных объемах.

Напряжение, соответствующее точке  $A$  (см. рис. 3.2), называют **пределом пропорциональности** ( $\sigma_{пц}$ ). Обычно определяют условный предел пропорциональности, т. е. напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между нагрузкой и удлинением достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой деформации с осью напряжений, увеличивается на 50 % своего значения на линейном (упругом) участке.

Напряжения, не превышающие предела пропорциональности, практически вызывают только упругие (в микроскопическом смысле) деформации, поэтому нередко отождествляют с условным пределом упругости.

**Предел упругости** ( $\sigma_{уп}$  или  $\sigma_{0,05}$ , точка *B*) определяется как напряжение, при котором остаточная деформация достигает 0,05 % (или меньше) первоначальной длины образца:

$$\sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0}. \quad (3.6)$$

Напряжение, вызывающее остаточную деформацию, равную 0,2 %, называют **условным пределом текучести**:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}. \quad (3.7)$$

При испытании железа и других металлов с ОЦК-решеткой при достижении определенного напряжения  $\sigma_T$  на кривой растяжения образуется площадка. Напряжение, при котором образец деформируется без увеличения нагрузки, называется **физическим пределом текучести** (точка *C*):

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}. \quad (3.8)$$

Предел текучести  $\sigma_{0,2}$  является расчетной характеристикой, некоторая доля от  $\sigma_{0,2}$  определяет допустимую нагрузку, исключая остаточную деформацию. По величине  $\sigma_{0,2}$  при нормальной температуре различают три класса материалов (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Классификация сплавов по прочности

Класс материала	$\sigma_{0,2}$ , МПа		
	Fe-сплавы (стали)	Al-сплавы	Ti-сплавы
Низкой прочности	650	200	400
Средней прочности	650–1300	200–400	400–800
Высокой прочности	1300–1400	400	800

Если допустимые напряжения определяются величиной упругой деформации (жесткая конструкция), то в расчетах используется величина модуля упругости  $E$ . В этом случае стремиться к получению высокого значения  $\sigma_{0,2}$  не следует. Величины  $\sigma_{пц}$  и  $\sigma_{0,2}$  характеризуют сопротивление малым деформациям.

Дальнейшее повышение нагрузки вызывает более значительную пластическую деформацию во всем объеме металла. Напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца (точка *D*), называют **временным сопротивлением**, или **пределом прочности**:

$$\sigma_b = \frac{P_{\text{MAX}}}{F_0}. \quad (3.9)$$

У пластичных металлов, начиная с напряжения  $\sigma_b$ , деформация сосредоточивается в одном участке образца, где появляется местное сужение поперечного сечения – так называемая *шейка*. В результате развития множественного скольжения в шейке образуется высокая плотность вакансий и дислокаций, возникают зародышевые несплошности, укрупнение которых приводит к возникновению пор. Сливаясь, поры образуют трещину, которая распространяется в направлении, поперечном оси растяжения, и в некоторый момент образец разрушается (точка *K* на рис. 3.2).

На рис. 3.2 приведена диаграмма истинных напряжений (кривая 2). Учитывая, что роль пластической деформации несравненно больше, чем упругой, считают, что участок диаграммы, соответствующий упругой деформации, совпадает с осью координат.

Истинное сопротивление разрушению  $S_K$  определяется как отношение усилия в момент разрушения к минимальной площади поперечного сечения образца в месте разрыва:

$$S_K = \frac{P_K}{F_K}. \quad (3.10)$$

В случае хрупкого разрушения  $S_K$  и определяет действительное сопротивление отрыву или хрупкую прочность материала (см. рис. 3.2, точка *K*). При вязком разрушении (когда образуется шейка)  $\sigma_b$  и  $S_K$  характеризуют сопротивление значительной пластической деформации, а не разрушению. В конструкторских расчетах  $\sigma_b$  и  $S_K$  практически не используются, так как трудно представить конструкцию, работоспособность которой не нарушится при пластической деформации отдельных деталей или узлов.

Если пренебречь упругими деформациями, то коэффициент деформационного упрочнения  $K = [\text{tg } \alpha - (S_K - \sigma_{0,2})] / l_K$ .

Характеристики  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ , а также  $E$  являются базовыми – они включаются в ГОСТ на поставку конструкционных материалов, в паспортах приемочных испытаний, а также входят в расчеты прочности и ресурса.

**Работа пластической деформации при растяжении.** Величина работы пластической деформации служит важной характеристикой материала. Полная работа деформации  $A$  определяется площадью между первичной кривой растяжения и осью деформаций:

$$A = \int_0^{l_K} P d(\Delta l). \quad (3.11)$$

Кроме полной, определяют удельную работу деформации (вязкость материала), т. е. работу, отнесенную к единице объема расчетной длины образца ( $V$ ):

$$a = \frac{A}{V} = \frac{P \Delta l}{Fl}. \quad (3.12)$$

В первом приближении

$$a = (S_T + S_K) \cdot \frac{e_K}{2}. \quad (3.13)$$

Видно, что  $e_K = (S_K - S_T) \operatorname{tg} \beta$ , где  $\operatorname{tg} \beta$  – коэффициент деформационного упрочнения. Тогда

$$a = \frac{S_K^2 - S_T^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \beta}. \quad (3.14)$$

Удельная работа деформации – комплексная характеристика. Она определяется совокупностью прочностных и пластических свойств материала.

## 3.2. Методика проведения испытаний на растяжение

### 3.2.1. Стандартные образцы для испытания на растяжение

Для испытания на статическое растяжение применяют плоские образцы (рис. 3.3).

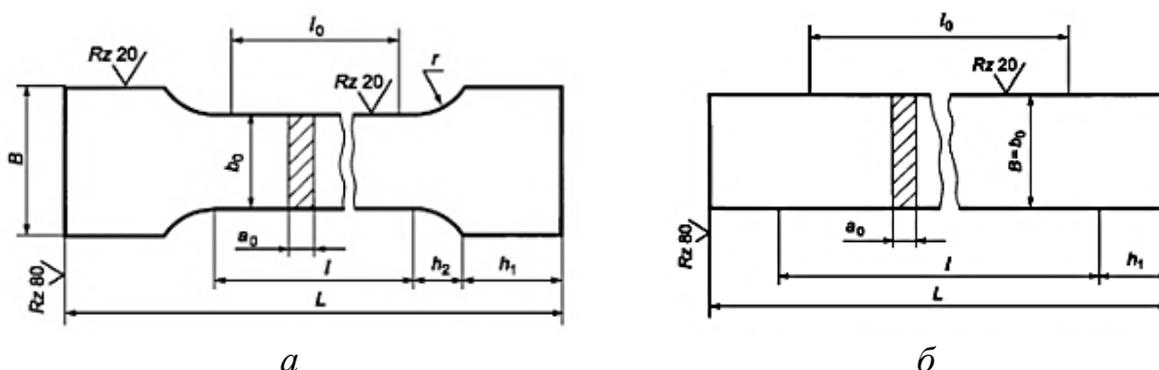


Рис. 3.3. Стандартные плоские образцы для испытания на растяжение:  
*a* – образец типа I с головками; *б* – образец типа II без головок

Перед испытаниями измеряют поперечное сечение образцов (у плоских – начальную толщину рабочей части  $a_0$ , мм, и начальную ширину  $b_0$ , мм). Измерения проводят в трех местах рабочей части образца (в середине и по краям). Начальная расчетная длина образца ограничивается неглубокими кернами, рисками или иными метками. Точность измерения  $b_0$  и  $l_0$  не менее 0,01 мм.

### 3.2.2. Испытательные машины

Испытание образцов на растяжение осуществляют на серийно выпускаемых испытательных машинах, которые должны соответствовать требованиям ГОСТ 28840–90. Тип испытательной машины, шкалу силоизмерителя и скорость нагружения определяют исходя из следующих условий: наименьшая предельная нагрузка машины должна составлять

0,2 нижнего диапазона нагружения, но не более 0,04 от наибольшей предельной нагрузки; скорость нагружения образца должна быть от 1,0 до 30,0 МПа с<sup>-1</sup>. Внешний вид испытательной машины показан на рис. 3.4.

Испытания образцов на растяжение при нормальной температуре проводят в диапазоне 15–30 °С. Наибольшую предельную нагрузку рассчитывают исходя из площади поперечного сечения рабочей части образца и ориентировочных значений временного сопротивления.

Скорости нагружения составляют от 0,5 до 100 мм/мин. Аналогично выбирают испытательные машины для толстых листов, кованных цилиндров и других образцов из сталей и сплавов.



Рис. 3.4. Внешний вид испытательной машины

Машины для испытания на растяжение очень разнообразны. Многие из них универсальны и могут использоваться при проведении других статических испытаний. Современные машины высшего класса представляют собой сложные, частично автоматизированные устройства; они чаще всего оснащаются компьютером, при помощи которого может производиться расчет любых характеристик в процессе испытаний или сразу же после испытаний.

### 3.2.3. Подготовка машины к испытанию

1. Установить захваты или выбрать приспособление для крепления образцов.
2. Установить шкалу силоизмерителя.
3. Подготовить записывающий прибор (диаграммный аппарат).
4. Определить масштаб записи диаграммы.
5. Заправить ленту и перо (подготовить самописец диаграммы).
6. Убрать с машины посторонние предметы.
7. Включить двигатель и опробовать машину без нагрузки для проверки влияния перемещения ее подвижных частей на чувствительность

силоизмерителя, стрелку которого необходимо установить на нуль шкалы и поставить перо записывающего прибора на нулевую отметку, а также проверить действие тормозного устройства.

8. Установить рабочий стол (траверсу) машины в положение, необходимое для фиксации испытательного образца.

9. При включенной машине установить образец, соосно закрепив головки (захваты для крепления образца).

### 3.2.4. Проведение испытаний

Установив образец на машине и выбрав зазоры, медленно нагружают образец, через 3–7 секунд увеличивают нагрузку до заданного значения. Нагрузку следует увеличивать плавно, чтобы испытатель мог следить за положением стрелки силоизмерителя относительно шкалы в любой момент испытания, при нарушении плавности возрастания нагрузки нужно снизить скорость нагружения. После разрыва образца немедленно выключают машину, записав максимальную нагрузку, снимают образец и диаграмму. Стол (траверсу) и стрелку силоизмерителя возвращают в исходное положение. Рабочее пространство машины очищают от осколков образца и от масла, после этого приступают к испытанию следующего образца.

Результаты испытаний записывают в соответствующие графы протокола. В нем указывают марку стали или сплава, число образцов, тип испытательной машины, масштаб измерения, а также скорость нагружения образца.

Для каждого образца в протоколе записывают его номер и условное обозначение, а также размеры расчетной части образца до испытания (начальную расчетную длину  $l_0$ , начальную толщину  $a_0$  и начальную ширину  $b_0$ , плоского образца). Кроме того, в протоколе записывают рассчитанную начальную площадь поперечного сечения образца  $F_0$ . После разрыва измеряют и заносят в протокол размеры образца:  $l_K$ ,  $a_K$ ,  $b_K$ ,  $F_K$ , а также указывают максимальную нагрузку  $P_{\text{МАХ}}$  и нагрузки  $P_{\text{пц}}$  и  $P_{0,2}$ , соответствующие пределу пропорциональности и условному пределу текучести.

**Определение относительного удлинения и сужения.** Относительное удлинение можно определить по первичной ДР. Определив абсолютное удлинение  $\Delta l$  к моменту разрушения в точке  $K$  (см. рис. 3.2) и зная начальную длину  $l_0$ , получим величину  $\delta$  по формуле (3.1). Недостаточная жесткость многих испытательных машин делает расчет по ДР менее точным, чем по результатам измерения расчетной –  $l_K$  разорванного образца. Для определения длины  $l_K$  обе части разорванного образца плотно прикладывают одну к другой и измеряют расстояние между метками.

Величину  $\psi$  определяют обычно при испытании цилиндрических образцов, для этого достаточно измерить диаметр образца в самом узком месте

в двух взаимно перпендикулярных направлениях и по среднеарифметическому определить  $P_K$ .

**Определение прочностных характеристик.** Графическое определение предела пропорциональности начинают с того, что продолжают прямолинейный участок до пересечения с осью деформаций в точке  $O$  (рис. 3.5). Последнюю принимают за новое начало координат, исключая искаженный из-за недостаточной жесткости машины начальный участок ДР.

Далее на произвольной высоте в пределах упругой области восстанавливают перпендикуляр к оси нагрузок, откладывают вдоль него отрезок  $BC = 0,5AB$  и проводят линию  $OC$ . Если теперь провести касательную к кривой растяжения параллельно  $OC$ , то точка касания  $P$  определит искомую нагрузку  $P_{ПЦ}$ . Существуют и другие способы определения  $P_{ПЦ}$ .

Для определения  $P_{0,05}$  и  $P_{0,2}$  на оси удлинений откладывают отрезок  $OK = 0,05 l_0 M / 100$  (для  $P_{0,05}$ ) или  $OK = 0,2 l_0 M / 100$  (для  $P_{0,2}$ ) и через точку  $K$  проводят прямую, параллельную прямолинейному участку ДР (рис. 3.6).  $M$  – масштаб диаграммы растяжения по оси деформации образца. Ордината точки  $S$  будет соответствовать искомому усилию. Физический предел текучести вычисляется по формуле

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}. \quad (3.15)$$

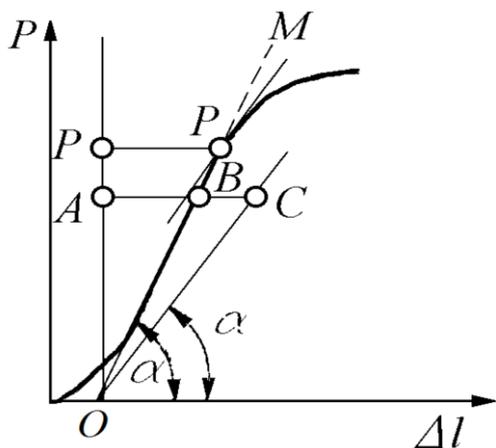


Рис. 3.5. Графическое определение предела пропорциональности

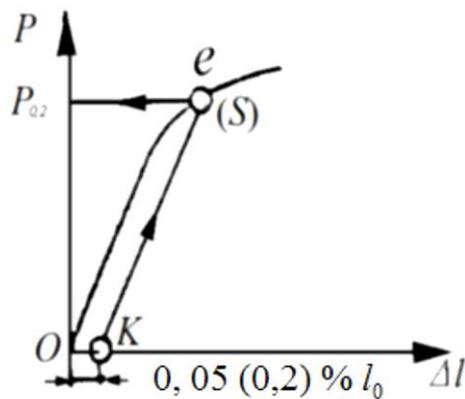


Рис. 3.6. Графическое определение условных пределов текучести и упругости

Существующие пределы текучести: физический  $\sigma_T$ , верхний  $\sigma_{ТВ}$  и нижний  $\sigma_{ТН}$ ; им соответствуют нагрузки  $P_T, P_{ТВ}$  и  $P_{ТН}$ . Нагрузкой  $P_T$  считают нагрузку на первичной диаграмме растяжения, где длина образца начинает увеличиваться при постоянной нагрузке (см. рис. 3.2, точка  $C$ ).

Наибольшую нагрузку, предшествующую напряжению разрушения образца, принимают за нагрузку  $P_{МАХ}$ , соответствующую временному сопротивлению образца (точка  $D$  на рис. 3.2.). Временное сопротивление определяют из соотношения

$$\sigma_B = \frac{P_{MAX}}{F_0}. \quad (3.16)$$

Истинное сопротивление разрыву определяют как отношение усилия в момент разрушения образца  $P_K$  к максимальному поперечному сечению образца в момент разрыва  $F_K$ . На первичной ДП усилие  $P_K$  определяется как ордината точки  $K$  на рис. 3.2.

Необходимо помнить, что графическое определение прочностных характеристик возможно только при достаточно большом масштабе увеличения по оси деформаций. Так, например, графическое определение  $\sigma_{0,05}$  допускается при масштабе по оси удлинения не менее 50 : 1, а для  $\sigma_{0,2}$  – не менее 10 : 1.

### 3.2.5. Динамические испытания на ударный изгиб образцов с надрезом (по ГОСТ 9454–78)

Динамические испытания на ударный изгиб выявляют склонность материала к хрупкому разрушению. Метод основан на разрушении образца с надрезом (концентратором) посередине одним ударом маятника массой  $P$ , падающего с определенной высоты  $H$ . При падении он разрушает образец и поднимается на высоту  $h$ . Работа  $K$ , Дж, затраченная на разрушение образца, определяется по формуле

$$K = PL(\cos \beta - \cos \alpha), \quad (3.17)$$

где  $L$  – длина маятника, м;  $\alpha$ ,  $\beta$  – углы подъема маятника соответственно до и после излома образца.

По величинам полной работы деформации и разрушения рассчитывается основная характеристика данного вида испытаний – ударная вязкость:

$$KC = \frac{K}{F}, \quad (3.18)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения образца в месте надреза до испытания.

Стандартная размерность ударной вязкости – кДж/м<sup>2</sup> или Дж/см<sup>2</sup>.

В зависимости от вида концентратора в образце в обозначение ударной вязкости вводится третий индекс:  $U$  –  $U$ -образный надрез,  $V$  –  $V$ -образный надрез,  $T$  –  $T$ -образный надрез (рис. 3.7). Например,  $KCV$  – ударная вязкость, определенная на образце с  $V$ -образным концентратором при комнатной температуре. Для обозначения ударной вязкости при пониженной или повышенной температуре используется цифровой индекс, соответствующий температуре испытания, например,  $KCT^{-60}$ . Ударная вязкость – это сложная, комплексная характеристика, зависящая от совокупности прочностных и пластических свойств материала. Внешний вид маятникового копра для проведения испытаний на ударную вязкость показан на рис. 3.8.



Рис. 3.7. Образцы для испытаний на ударный изгиб и способы обозначения ударной вязкости в зависимости от вида концентратора



Рис 3.8. Внешний вид маятникового копра для проведения испытаний на ударную вязкость

**Хладноломкость** – снижение ударной вязкости (охрупчивание) при понижении температуры. Склонность к хрупкому разрушению оценивается по температурной зависимости ударной вязкости и температуре хрупко-вязкого перехода (рис. 3.9, а). Снижение ударной вязкости происходит в некотором интервале температур, называемом *порогом хладноломкости* – точки 1 (начало порога) – 3 (конец порога). В некоторых случаях (при известных температурах эксплуатации) или порог хладноломкости принимают равным определенному значению ударной вязкости  $KC_2$  (точка 2), или температуру, при которой происходит снижение ударной вязкости на 50 %, – значение  $T_{50}$  (рис. 3.9, б). Хладноломкость проявляется у железа, металлов и сплавов, сталей с феррит-перлитной структурой, имеющих решетку ОЦК или ГПУ. Она практически отсутствует у металлов и сплавов, вязких даже при отрицательных температурах материалов, например у металлов (медь, алюминий) и сплавов (аустенитные стали) с ГЦК-решеткой.

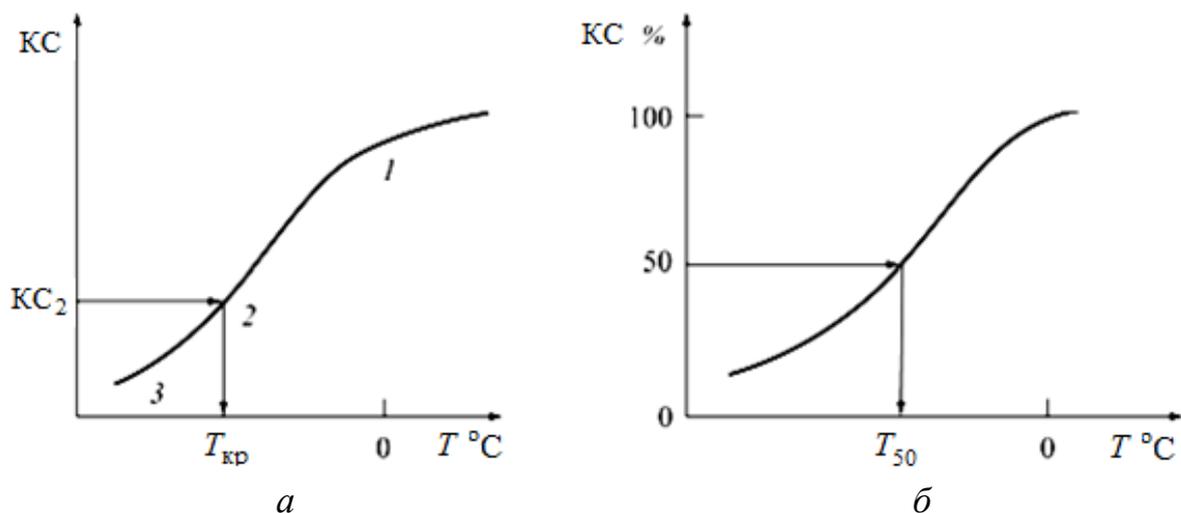


Рис. 3.9. Определение порога хладноломкости (а) и  $T_{50}$  (б)

Зная  $T_{кр}$  и рабочую температуру  $T_p$  испытуемого материала, можно оценить его температурный запас вязкости:

$$X = \frac{(T_p - T_{кр})}{T_p}. \quad (3.19)$$

Чем больше  $X$ , тем меньше опасность хрупкого разрушения.

Поскольку хрупкий и вязкий характер разрушения при ударном изгибе четко различаются по виду излома: блестящий «кристаллический» или матовый «волоконистый»,  $T_{кр}$  можно определять по структуре излома. За  $T_{кр}$  принимают температуру, при которой в изломе появляются первые участки хрупкого разрушения или он становится полностью хрупким.

### 3.2.6. Методика проведения ударных испытаний

Испытания на ударную вязкость выполняются на маятниковых копрах типа МК-30, предназначенных для испытания металлов, и на копрах типа МК-0,5-1, предназначенных для испытания пластмасс и других неметаллических материалов.

Основным образцом по ГОСТ 9454–78 служит стержень с квадратным сечением  $10 \times 10$  мм и длиной 55 мм.

Допускается использование образцов шириной  $B = 7,5; 5$  и  $2,0$  мм. В последнем случае  $H = 8$  мм. Образцы с V-образным концентратором (образцы Сенаже) являются основными и используются при контроле металлических материалов для ответственных конструкций (летательных аппаратов, транспортных средств и т. д.). Образцы Шарки с U-образным надрезом рекомендуется применять при выборе и приемочном контроле материалов, до установления норм с V-образным концентратором. Образцы с T-образным надрезом предназначены для испытания материалов, работающих в особо ответственных конструкциях, где сопротивление развитию трещины имеет первостепенное значение.

### 3.3. Оборудование и инструмент

1. Машина разрывная любого типа.
2. Маятниковый копер МК-0,5-1.
3. Печь муфельная с измерителем температуры.
4. Шаблон для подготовки образцов по ГОСТ 9454–78.
5. Штангенциркуль с ценой деления 0,01 мм.
6. Молоток слесарный ( $P = 150$  г), клещи.

### 3.4. Порядок выполнения работы

1. Изучить описание лабораторной работы и инструкции по эксплуатации используемого оборудования.
2. По указанию преподавателя получить у лаборанта материалы для испытания на растяжение.
3. Подготовить образцы для испытания на растяжение по ГОСТ 1497–2023.
4. Провести испытание образцов на растяжение по ГОСТ 1497–2023.
5. Оформить протокол испытаний (табл. 3.2).

Таблица 3.2

#### Протокол испытаний на растяжение

Форма и материал образцов \_\_\_\_\_ Машина \_\_\_\_\_  
 Рабочая шкала \_\_\_\_\_

Но- мер об- раз- ца	Размеры образца до испыта- ний, мм			Нагрузки, Н				Условные механические напряжения, МПа				Разме- ры после испы- таний, мм <sup>2</sup>		Характеристи- ки пластич- ности, %				Испы- танные напря- жения, МПа		Вяз- кость мате- риала, Н/м <sup>2</sup>
	$h_0$	$l_0$	$F_0$	$P_{II}$	$P_{0,2}$	$P_T$	$P_B$	$\sigma_{II}$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_T$	$\sigma_b$	$l_K$	$F_K$	$\delta$	$\psi$	$e$	$\phi$	$S_T$	$S_K$	

6. По указанию преподавателя получить у лаборанта материалы для испытаний на ударную вязкость.
7. Подготовить образцы испытаний на ударную вязкость по ГОСТ 9454–78.
8. Провести испытание образцов на ударную вязкость.
9. Оформить протокол испытаний (табл. 3.3).
10. По указанию преподавателя получить материал для исследования температурной зависимости величины ударной вязкости.
11. Подготовить 10–12 образцов по ГОСТ 9454–78.
12. Построить температурную зависимость ударной вязкости в диапазоне температур, указанном преподавателем. Испытания при различных

температурах производят с использованием тех же образцов, что и при комнатных. Образец выдерживают в печи или жидком хладагенте не менее 15 мин при температуре на 2–6 °С выше или ниже заданной. Время установки образца на копер с момента выемки из печи до удара маятника не должно превышать 3–5 с.

13. По температурной зависимости КС – Т и характеру излома образцов определить температуру вязко-хрупкого перехода испытуемого материала ( $T_{xp}$ ) и оценить его температурный запас вязкости ( $X$ ).

Таблица 3.3

Протокол испытания на ударную вязкость \_\_\_\_\_ на копре \_\_\_\_\_ мощностью \_\_\_\_\_

Материал образца	Размеры и площадь поперечного сечения, м	Угол подъема маятника, град		Работа удара, кДж	Ударная вязкость КС, кДж/м <sup>2</sup>	Характер излома
		до излома	после излома			

### 3.5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Индивидуальное задание (основные характеристики испытуемых материалов, чертежи образцов).
3. Теоретическая проработка вопроса.
4. Первичные и истинные диаграммы растяжения.
5. Протоколы испытаний материалов на растяжение и ударную вязкость.
6. Температурная зависимость КС-Т.
7. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

### 3.6. Контрольные вопросы

1. Назвать основные виды динамических испытаний материалов.
2. Перечислить основные виды статических испытаний материалов.
3. Перечислить основные прочностные характеристики материалов.
4. Какие есть основные пластические характеристики материалов?
5. Назвать основные динамические характеристики материалов.
6. Как обозначаются параметры ударной вязкости на чертежах?
7. Какова методика проведения испытаний на статическое растяжение?
8. Как определяется ударная вязкость при различных температурах?
9. Что такое вязкий и хрупкий излом материала?

10. Зависят ли параметры прочности и пластичности от дислокационной структуры?

11. Что понимается под термином «температурный запас вязкости материала»?

## Лабораторная работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Цель работы:** ознакомление с основными свойствами магнитных материалов, изучение процессов перемагничивания элементов из магнитных материалов в переменных магнитных полях, определение температуры Кюри и граничной частоты исследуемых материалов, определение основных характеристик пленочных структур на основе феррит-гранатов.

#### 4.1. Краткие теоретические сведения

В соответствии с современными представлениями магнитные свойства материалов обусловлены следующими тремя причинами:

- наличием у электрона спинового магнитного момента;
- орбитальным движением электронов в атоме, приводящим к появлению некоторого результирующего магнитного момента за счет пространственного движения электронного облака;
- магнитным моментом атомного ядра вследствие наличия спиновых моментов протонов и нейтронов.

Главными причинами, ответственными за наблюдаемые магнитные свойства материалов, являются первые две, так как спиновый магнитный момент ядра не превышает 0,1 % спинового магнитного момента электрона. Однако если в атоме имеется четное число электронов, то вследствие спаривания, согласно принципу Паули, электронов с противоположными спинами результирующий магнитный момент окажется равным нулю. Поэтому спиновые магнитные моменты электронов проявляются лишь в веществах, имеющих недостроенные внутренние электронные оболочки, в частности, в ряде переходных металлов. Например, в оболочке  $3d$  железа на 10 возможных орбиталях имеется лишь шесть электронов, причем спины пяти из них направлены параллельно и лишь одного антипараллельно. Это имеет место и в других магнитных материалах – никеле, кобальте, гадолинии, гольмии, их соединениях и сплавах.

Дополнительным условием проявления магнитных свойств вещества является особое соотношение энергии электростатического взаимодействия электронов и взаимной ориентации их спинов.

За единицу измерения атомных магнитных моментов принят магнетон Бора:

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m} = 9,27 \cdot 10^{-24}, \text{ А}\cdot\text{м}^2, \quad (4.1)$$

где  $h$  – постоянная Планка;

$e$ ,  $m$  – заряд и масса электрона соответственно.

На практике для характеристики магнитных свойств материалов используются другие величины, которые характеризуют взаимодействие материала с внешним магнитным полем и являются более удобными для экспериментального определения. К ним относятся величины магнитной восприимчивости  $\xi$  и магнитной проницаемости  $\mu$ :

$$\xi = \frac{M}{H}, \quad (4.2)$$

где  $M$  – величина намагниченности вещества;

$H$  – напряженность внешнего магнитного поля, измеряемая в А/м;

$$\mu = \mu_0(1 + \xi) = \frac{B}{H}, \quad (4.3)$$

где  $B$  – магнитная индукция, Тл;

$\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Диамагнетики и парамагнетики, у которых величина  $\mu$  приблизительно равна единице, относятся к слабомагнитным материалам.

Практическое применение в технике и, в частности, в информатике и радиоэлектронике, получили ферро- и ферримагнитные материалы, у которых величина  $\mu$  значительно больше единицы и значений  $10^6$ . Кроме того, они имеют сложный характер зависимости магнитных свойств от температуры и напряженности внешнего магнитного поля. Так, их магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость при повышении температуры достигают максимума вблизи точки Кюри, а при более высоких значениях температуры резко убывают, в результате чего ферромагнитное состояние переходит в парамагнитное.

Зависимость намагниченности вещества от величины внешнего магнитного поля предопределяет явление гистерезиса и потери энергии ферромагнитных материалов при их перемагничивании. Кроме того, в этих материалах имеет место спонтанная намагниченность, заключающаяся в том, что в отдельных макроскопических областях – доменах – магнитные моменты атомов располагаются параллельно. Результирующий магнитный момент образца из ферромагнитного вещества близок к нулю, если домены расположены в нем хаотично относительно друг друга, и отличен от нуля, если они имеют преимущественную ориентировку в пространстве. Последнее может иметь место вследствие исходной ориентации доменов на этапе изготовления образца или в результате их переориентации под действием достаточного по величине внешнего магнитного поля.

В относительно слабых магнитных полях ( $H < 0,1$  А/м) зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля линейная. Величина магнитной проницаемости определяется тангенсом угла наклона кривой  $B = f(H)$ :

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (4.4)$$

и для данного случая на зависимости магнитной индукции от напряженности поля (рис. 4.1) соответствует углу  $\alpha$ .

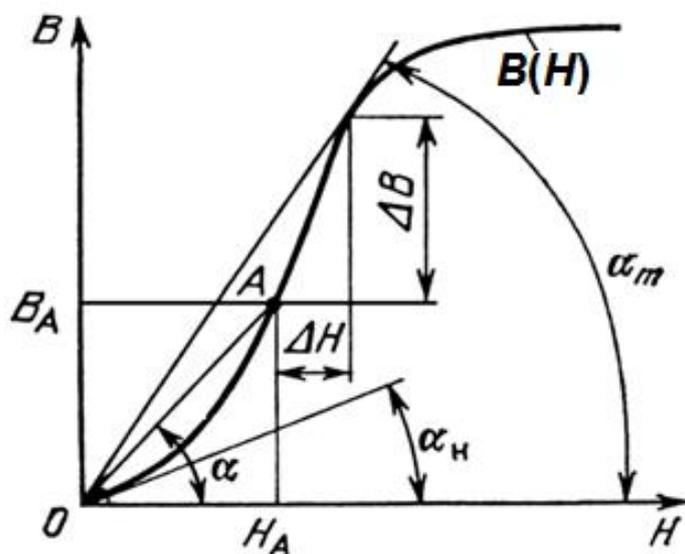


Рис. 4.1. Кривая намагничивания ферро- и ферримагнетиков

Состояние магнитного материала характеризуется при этом обратимым смещением границ доменов, т. е. при возрастании поля пограничные слои доменов смещаются таким образом, что благоприятно ориентированные относительно внешнего поля домены несколько увеличиваются в объеме, а при снятии внешнего поля границы доменов занимают исходные положения и величина магнитной индукции становится равной нулю. Магнитная проницаемость  $\mu$  в этом случае считается начальной –  $\mu_n$ .

При повышении величины магнитного поля значение магнитной проницаемости увеличивается до максимальной, соответствующей углу наклона  $\alpha_m$ . При этом на всем участке кривой начиная с точки A (рис. 4.1), магнитный материал находится в состоянии необратимого смещения границ доменов, которое означает, что при снятии внешнего магнитного поля домены не возвращаются в исходное состояние и появляется остаточная намагниченность. Для достижения состояния, при котором  $B = 0$ , требуется приложение противоположно направленного магнитного поля, т. е. возникает явление магнитного гистерезиса (отставания  $B$  от  $H$ ), графически отображаемого петлей гистерезиса.

Величина магнитной проницаемости определяется положением рабочей точки и крутизной кривой  $B = f(H)$ . Для произвольной рабочей точки вводится понятие дифференциальной магнитной проницаемости, используемое для характеристики состояния магнитного материала при одновременном воздействии на него постоянного и переменного магнитного полей, что имеет место, например, при работе магнитных усилителей, и понятие импульсной магнитной проницаемости, определяемой на отрезке кривой в интервалах  $\Delta H - \Delta B$ .

При дальнейшем повышении величины магнитного поля начинает происходить поворот векторов намагниченности доменов в направлении внешнего поля, и материал входит в состояние магнитного насыщения, при котором подавляющее большинство доменов «выстраиваются» по направлению поля, образуется как бы монодоменная структура и зависимость  $B = f(H)$  становится почти горизонтальной.

При изменении температуры в пределах до точки Кюри величина магнитной проницаемости изменяется, так как изменяется амплитуда колебаний узлов кристаллической решетки материала, и температурную зависимость  $\mu$  определяют температурным коэффициентом магнитной проницаемости:

$$\alpha_m = \frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dT}. \quad (4.5)$$

Температурный коэффициент магнитной проницаемости показывает относительное изменение величины магнитной проницаемости при изменении температуры на один градус.

Петлю гистерезиса удобно наблюдать в переменных магнитных полях. Форма петли гистерезиса магнитного материала зависит от его исходного состояния, скорости перемагничивания и максимальной напряженности магнитного поля, регулируя значение которого, можно получить семейство петель гистерезиса ферромагнитного материала, представленных на рис. 4.2.

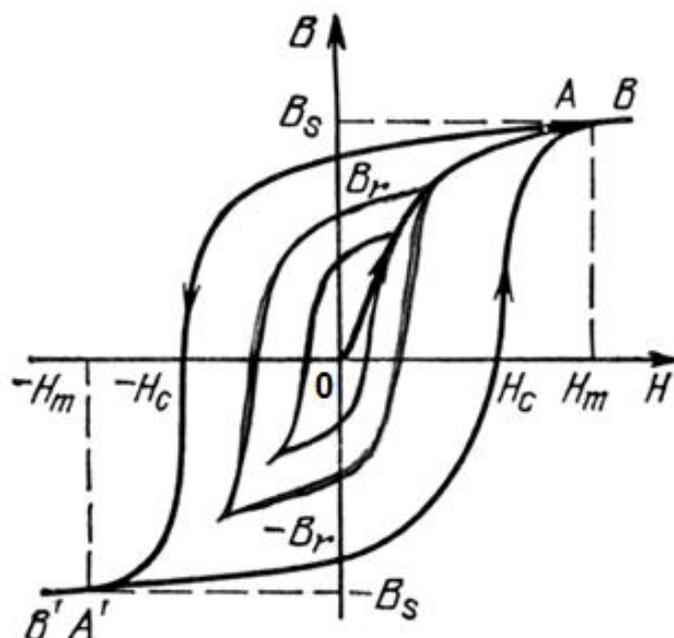


Рис. 4.2. Семейство петель гистерезиса ферромагнетика:  
 $B_S$  и  $H_m$  соответственно индукция и поле насыщения;  
 $B_r$  — остаточная индукция и  $H_c$  — коэрцитивная сила

Для слабых магнитных полей петля гистерезиса имеет вид эллипса и называется частичной, а петля, полученная при условии насыщения,

называется предельной и по ней определяют такие инженерные характеристики магнитного материала, как индукция насыщения  $B_s$ , остаточная индукция  $B_r$  и коэрцитивная сила  $H_c$ . Обычно используются абсолютные значения этих величин. Магнитные материалы с низким значением коэрцитивной силы и большой магнитной проницаемостью называют магнитомягкими, а с высокими значениями  $B_r$  и  $H_c$  – магнитотвердыми.

Следует иметь в виду, что при определении характеризующих магнитный материал величин требуется медленное (квазистатическое) изменение поля. Полученная в таких условиях петля гистерезиса называется статической.

Из нее также определяют величину магнитных потерь, которая пропорциональна площади петли. Удельные потери относят к массе материала, их величина зависит не только от вида материала, но и от других факторов, таких как наличие примесей, дефектов кристаллического строения, остаточных механических напряжений, температуры.

При изучении магнитных материалов в переменных магнитных полях обнаруживается, что при том же значении максимальной индукции теперь уже динамическая петля гистерезиса становится шире и имеет большую площадь. Это связано с дополнительными магнитными потерями – на вихревые токи и на последствие. Последний вид потерь связан с магнитной вязкостью материала. Применяется также такая характеристика, как тангенс угла магнитных потерь  $\tan \delta$ . Угол  $\delta$  показывает отставание по фазе магнитной индукции от напряженности поля, которое обусловлено действием вихревых токов, препятствующих изменению индукции, а также гистерезисом и магнитной вязкостью.

Зависимость магнитной проницаемости от частоты переменного магнитного поля называется дисперсией магнитной проницаемости и может иметь релаксационный или резонансный характер, который представлен зависимостью магнитной проницаемости от частоты на рис. 4.3.

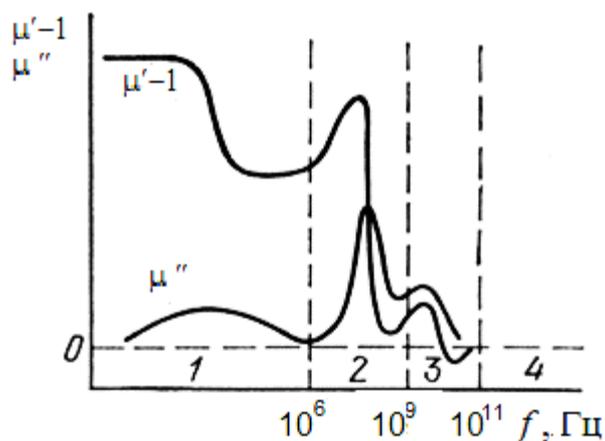


Рис. 4.3. Зависимости упругой и вязкой составляющих магнитной проницаемости от частоты внешнего поля

Под магнитной релаксацией понимают установление термодинамического равновесия системы магнитных доменов, в процессе которой происходит переход энергии движения магнитных доменов в теплоту со снижением внутренней энергии системы. Такой процесс объясняется рассеянием спиновых волн при взаимодействии друг с другом, с фононами и электронами проводимости в металлах. Резонансные явления возникают при приближении частоты внешнего поля к частоте одного из типов колебаний, свойственных системе, и для всех ферромагнитных материалов обусловлены избирательным поглощением энергии электромагнитного поля на частотах, совпадающих с собственными частотами колебаний границ доменов или с частотами прецессии магнитных моментов электронов, ответственных за явление магнетизма в этих материалах.

На относительно низкой частоте (до нескольких мегагерц) кроме наиболее характерных видов потерь, определенный вклад вносят потери, связанные с магнитострикционными колебаниями, проявляющимися в результате деформации кристаллической решетки при намагничивании внешним полем. Из основных ферромагнитных элементов (Fe, Co, Ni) наибольшей магнитострикцией обладает Ni. Это явление используется в генераторах механических колебаний ультразвуковых частот, называемых магнитострикторами.

В диапазоне радиочастот (до единиц гигагерц) имеющие место резонансные явления вызваны взаимодействием границ доменов и релаксацией граничных слоев, которая в ферромагнитных металлах и их сплавах связана с микроскопическими вихревыми токами, а в ферритах – со спин-спиновыми и спин-решеточными взаимодействиями. Максимальное значение  $\mu$  наблюдается, когда частота внешнего поля совпадает с собственной частотой колебаний граничных слоев.

В области СВЧ частотные зависимости потерь обусловлены ферромагнитным резонансом, который связан главным образом с прецессией спинов и релаксацией магнитных моментов; смещение же границ доменов практически не происходит в силу своей некоторой инерционности.

Для инженерной оценки предельной частоты, на которой могут работать магнитные материалы, используется величина критической частоты, которая определяется снижением  $\operatorname{tg} \delta$  до определенного значения, например для ферритов до величины 0,02 или 0,1, которая дополнительно оговаривается.

При намагничивании ферромагнетиков во внешнем магнитном поле проявляется также эффект Томсона, заключающийся в изменении их удельного электрического сопротивления. Это происходит за счет изменения направлений векторов самопроизвольной намагниченности, в результате которого искривляются траектории электронов проводимости под действием силы Лоренца. В большинстве ферромагнитных материалов удельное сопротивление возрастает, когда ток направлен вдоль или против направления намагниченности, и снижается, когда векторы плотности тока и

намагниченности перпендикулярны (соответственно продольный и поперечный эффект Томсона).

Кроме того, для магнитных материалов характерен магнитооптический эффект (эффект Фарадея), заключающийся в изменении вектора поляризации пучка света при прохождении через магнитную среду. Разумеется, этот эффект проявляется при использовании прозрачных магнитных материалов или тонких магнитных пленок (при толщине менее порядка 0,1 мкм металлические пленки частично прозрачны). Эффект Фарадея используется для наблюдения доменной структуры, создания оптических вентилях, циркуляторов, модуляторов в оптоэлектронных приборах и устройствах (рис. 4.4). С середины 90-х годов XX века магнитооптический эффект получил широкое практическое применение в устройствах памяти, допускающих многократную запись больших информационных объемов. Одной из наиболее информативных магнитооптических характеристик является коэффициент оптической добротности – отношение удельного фарадеевского вращения к коэффициенту поглощения материала.

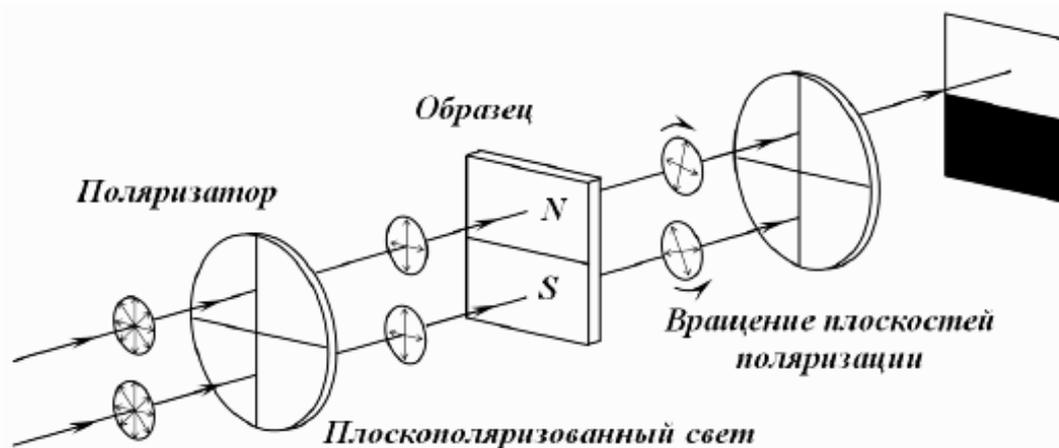


Рис. 4.4. Использование эффекта Фарадея в оптоэлектронных приборах и устройствах

К магнитомягким материалам, которые отличаются малой коэрцитивной силой, большой индукцией насыщения и также должны обеспечивать за счет специальных мер минимальные потери мощности при работе в переменных полях, относятся следующие виды материалов.

1. Железо повышенной чистоты, в частности, электролитическое, карбонильное, полученное в виде пленок методом химического осаждения из газовой фазы; технически чистое железо (армко-железо), низкоуглеродистая электротехническая сталь.

2. Кремнистая электротехническая сталь, имеющая несколько более высокое удельное электросопротивление и поэтому меньшие магнитные потери.

3. Сплавы высокой проницаемости: пермаллои (сплавы на железо-никелевой основе), имеющие наиболее высокое значение  $\mu$ , но отличающиеся

сильной зависимостью от механических напряжений, в том числе вносимых размерной обработкой; более дешевые, но нетехнологичные альсиферы (сплав состава 9,5 % Si – 5,6 % Al – Fe – остальное), которые имеет значение  $\mu = 7000$ , но являются хрупкими; альфенолы (16 % Al – Fe – остальное), отличающиеся повышенной устойчивостью к истиранию; тарменолы (15 % Al – 3 % Mo – Fe – остальное); многокомпонентные аморфные сплавы, в которых содержится до 85 % Fe, Ni, Co основы, стеклообразователь (Si, C, P, B) и легирующие элементы из числа переходных металлов (Cr, Ta, Mn и др.).

4. Магнитомягкие ферриты, обладающие магнитной проницаемостью на уровне тысяч единиц, малой коэрцитивной силой и наиболее низкими магнитными потерями. Последнее обстоятельство объясняется тем, что ферриты (ферримагнетики по своей природе) являются диэлектрическими материалами, в которых подавляются потери на вихревые токи. Типичными представителями материалов этого класса являются оксидные структуры типа магнетита ( $m\text{FeO} \cdot n\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), в которой некоторые из ионов  $\text{Fe}^{++}$  замещены двухвалентным металлом (Me) – Mn, Ni, Zn, Mg и др.

*Ферримагнитный эффект* – это нескомпенсированный антиферромагнетизм, который характеризуется ферримагнитным атомным порядком. Это означает, что магнитные моменты атомов антипараллельны и нескомпенсированы. Вещество по кристаллической структуре состоит из двух подрешеток, создающих встречные нескомпенсированные моменты.

Для таких веществ  $\mu \gg 1$  и зависит от температуры, причем при некоторой  $T_N$  (температуре Нееля) наступает компенсация встречных магнитных моментов и вещество теряет магнитные свойства.

Наиболее широкое применение получили никель-цинковые, магниевомарганцевые и марганцево-цинковые ферриты со структурой шпинели ( $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), которые имеют общую формулу  $\text{MeO} \cdot \text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Намагниченность насыщения таких ферритов составляет 0,2–0,7 Тл. В диапазоне СВЧ наилучшими свойствами среди ферритов обладают феррит-гранаты, имеющие формулу  $(\text{Y}_2\text{O}_3)_3 \cdot (\text{Fe}_2\text{O}_3)_5$ ,  $(\text{R}_2\text{O}_3)_3 \cdot (\text{Fe}_2\text{O}_3)_5$  или  $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , где  $R$  – трехвалентный ион редкоземельного металла, например гадолиния, люцерия и др., а также ортоферриты, имеющие формулу  $\text{RFeO}_3$ . Некоторые виды феррит-гранатов прозрачны в оптическом диапазоне и используются в качестве среды для создания особых типов лазеров, в которых управление частотой и поляризацией лазерного излучения осуществляется внешним магнитным полем, воздействующим непосредственно на рабочую среду.

Помимо ферритов низкие потери на вихревые токи имеют магнитодиэлектрики, также используемые в области радиочастот и СВЧ. Магнитодиэлектрики изготавливают методами порошковой металлургии, т. е. путем прессования ферромагнитного порошка (карбонильного железа, альсифера и др.) с изолирующей связкой (фенолоформальдегидные смолы, стекла, стекломали, полистирол и др.). Таким образом, они представляют

собой композицию из тонкодисперсного порошка низкокоэрцитивного ферромагнетика, частицы которого изолированы друг от друга, но механически связаны диэлектрическим материалом. Доля изолирующего материала составляет 5–15 %.

Некоторые характеристики магнитомягких материалов приведены в табл. 4.1, а феррит-гранатов – в табл. 4.2.

Таблица 4.1

Основные характеристики магнитомягких материалов

Материал	$\mu_n$	$\mu_m$	$H_c$ , А/м	$\rho_v$ , Ом·м	$f_{кр}$ , МГц
Низкоуглеродистая сталь	250–400	$5 \cdot 10^3$	32–95	$10^{-7}$	–
Электролитическое железо	600	$15 \cdot 10^3$	30	$10^{-7}$	–
Карбонильное железо	$3 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$	6,4	–	–
Пермаллой (50 % Ni, 50 % Fe)	$3 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	5–32	$9 \cdot 10^{-7}$	–
Пермаллой (79 % Ni, Fe – ост.)	$35 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^4$	0,8–4,0	$5 \cdot 10^{-7}$	–
Ферриты марок:					
2000НМ	$25 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	0,25	$10^{-2}$	0,005
2000НН	$2 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$	10–700	0,5	0,6
600НН	$0,7 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3$	10–400	$10^4$	0,4
150НН	$0,1 \cdot 10^3$	$0,3 \cdot 10^3$		$10^4$	25

Таблица 4.2

Коэффициент оптической добротности кристаллов, %/дБ

Длина волны излучения, мкм	Феррит-гранаты		Ортоферрит $RFeO_3$
	$Y_3Fe_5O_{12}$	$Gd_3Fe_5O_{12}$	
0,5	0,3	0,1	–
0,6	0,4	0,2	10
1,06	7	–	свыше 10
1,5	свыше 100	100	100

В магнитных материалах с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) статическая петля гистерезиса имеет коэффициент прямоугольности  $\beta = B_s / B_r$  не менее 0,85. Кроме того, они должны иметь малое время переключения (микросекунды) и высокую стабильность свойств. Таким требованиям удовлетворяют ферриты системы  $MgO \cdot MnO \cdot Fe_2O_3$ , с примесями Zn и Ca. Они применяются в устройствах автоматики, вычислительной техники, средствах связи.

Тенденции к микроминиатюризации и повышению быстродействия элементов магнитной электроники потребовали использования специфических доменных структур – полосовых, цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) и др., образующихся в тонких магнитных пленках. В приборных структурах применяются такие их свойства, как смещение границ, возможность генерации, управляемого движения и локализации доменов в заданном месте, поворот доменных границ и др. Доменные структуры, параметрами которых можно управлять с помощью внешних воздействий (магнитных, тепловых, механических, оптических), называют управляемыми. Наибольший практический интерес среди них имеют ЦМД-структуры, которые возникают при определенных условиях в тонких монокристаллических пластинках или пленках некоторых ферритов с сильной одноосной магнитной анизотропией.

Если из монокристалла такого магнетика вырезать тонкую ( $< 50$  мкм) пластинку в направлении, перпендикулярном оси легкого намагничивания, то в ней возникает лабиринтная доменная структура (рис. 4.5, *a*). Векторы намагничивания в доменах ориентированы вдоль нормали к поверхности в положительном или отрицательном направлении, чему на рис. 4.5 соответствуют темные и светлые участки.

При воздействии на пластинку внешнего магнитного поля  $H_{вн}$ , направленного перпендикулярно поверхности, лабиринтные домены по мере увеличения его напряженности сначала разрываются, приобретая гантельную форму, а затем формируется структура с ЦМД (рис. 4.5, *б–г*), радиус которых постепенно уменьшается. Наконец, вся пластинка намагничивается однородно в направлении внешнего поля, т. е. ЦМД существуют только в определенном диапазоне значений  $H_{вн}$ , хотя в реальных материалах возможно их устойчивое существование и без внешнего поля. Для этого «разрезают» полосовые домены с помощью специальных магнитных аппликаций и генераторов ЦМД, в которых используются вращающиеся магнитные поля.

Для практического применения разработаны материалы (например, пленки иттриевых или РЗМ-ортоферритов на сапфире, феррит-гранатов) с ЦМД радиусом менее микрометра и высокой подвижностью в неоднородных магнитных полях. В основном данные параметры определяют эффективность этих материалов в устройствах хранения и обработки информации.

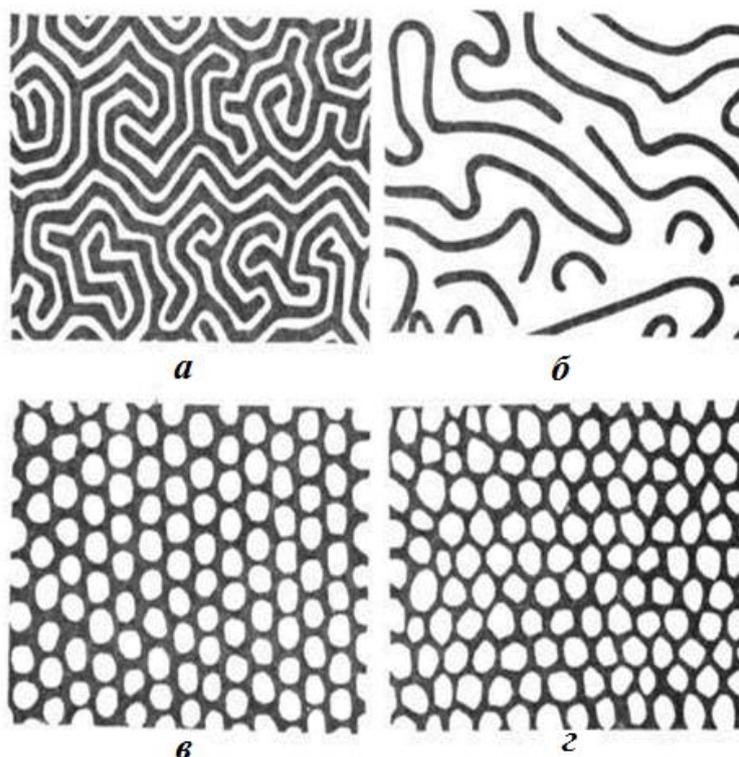


Рис. 4.5. Доменная структура в материалах-носителях ЦМД:  
 а – лабиринтная ( $H_{вн} = 0$ ); б – переходная ( $H_{вн}$  – мало); в – решетка ЦМД  
 ( $H_{вн}$  – велико); г – сотовая ЦМД ( $H_{вн}$  – велико)

*Аморфные магнитные сплавы* – современные магнитные материалы на основе сплавов системы Fe – Ni – Co с аморфной структурой и характеристиками, превышающими аналогичные свойства кристаллических пермаллоев. Они обладают комплексом уникальных магнитных и прочностных свойств, коррозионной стойкостью, большим удельным сопротивлением. Изделия из аморфных магнитомягких сплавов имеют высокие начальную и максимальную проницаемость  $\mu = 5000\text{--}370\ 000$ , индукцию насыщения  $B_s = 0,78\text{--}1,5$  Т, малую коэрцитивную силу  $H_c = 0,15\text{--}10$  А/м,  $\rho = 0,013\text{--}0,016$  Ом·м.

Аморфные магнитные сплавы технологичны при изготовлении и обработке. Очень важным обстоятельством, стимулирующим их внедрение, является необязательность отжига при изготовлении магнитопроводов. Для получения оптимальных магнитных свойств применяют термомагнитную обработку (ТМО), которая проще термообработки пермаллоя.

#### 4.2. Структурная схема измерений

Для изучения динамической петли гистерезиса магнитного материала на различных частотах с помощью осциллографа необходимо собрать установку, структурная схема которой показана на рис. 4.6.

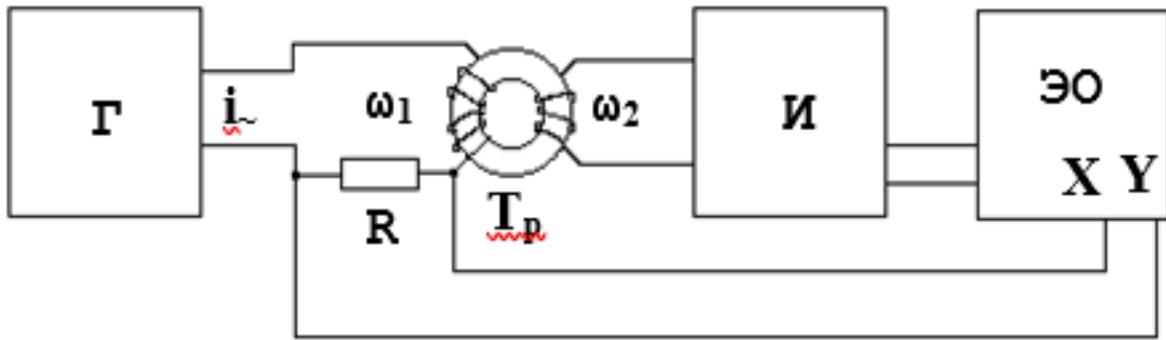


Рис. 4.6. Структура установки для изучения динамической петли гистерезиса ферро- и ферримагнитных материалов

В качестве исследуемого образца используется ферро- или ферримагнитный тороид  $T_p$  и первичная его обмотка с числом витков  $\omega_1$ , которая питается током переменной частоты  $i_{\sim}$  через сопротивление  $R$ , далее сигнал поданный с генератора  $\Gamma$ , проходит через интегратор  $\text{И}$  и петля гистерезиса отображается на экране осциллографа  $\text{ЭО}$ .

Чтобы найти напряженность магнитного поля  $H$  в образце, воспользуемся следующей формулой:

$$H = \mu\mu_0\omega_1 i_{\sim}, \quad (4.6)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость образца;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м).

Напряжение на горизонтальных пластинах осциллографа  $U_x$  пропорционально напряженности магнитного поля в образце:

$$U_x = i_{\sim}R = R / \mu\mu_0\omega_1 H. \quad (4.7)$$

Во вторичной обмотке тороида с числом витков  $\omega_2$  источником тока является ЭДС индукции  $E$ , равная

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -S\omega_2 \frac{dB}{dt}, \quad (4.8)$$

где  $\Phi$  – поток вектора магнитной индукции в образце.

Поскольку  $\omega_2$  мало, самоиндукцией можно пренебречь. Тогда при известном сечении тороида  $S$  напряжение на вертикальных пластинах осциллографа

$$U_y = -k\omega_2 SB, \quad (4.9)$$

где  $k$  – постоянная интегратора  $\text{И}$ .

В результате на вход  $X$  подается напряжение, пропорциональное  $H$ , а на  $Y$  – пропорциональное  $B$ , и на экране осциллографа получается петля гистерезиса  $B = f(H)$ . Изменяя величину тока  $i_{\sim}$ , можно получить семейство петель гистерезиса вплоть до максимальной при различных частотах  $f$ .

### 4.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы и инструкциями к приборам и оборудованию.

2. Получить у лаборанта образцы магнитных материалов и необходимые для выполнения работы принадлежности.

3. Получить петли гистерезиса исследуемых образцов с помощью осциллографа, собрав установку по схеме, изображенной на рис. 4.5.

4. Прокалибровать шкалу экрана осциллографа и по максимальной петле гистерезиса, используя выражения (4.7), (4.9), определить значения  $H_c$ ,  $B_s$ ,  $B_r$  и коэффициент квадратичности  $\alpha$  исследуемых материалов при 20, 40 и 60 °С.

5. Построить зависимость магнитных характеристик образцов  $H_c$ ,  $B_r$  и  $B_s$  от частоты при 20 °С в интервале 1–200 кГц.

6. По указаниям преподавателя или лаборанта собрать лабораторный макет для наблюдения структуры ЦМД с помощью эффекта Фарадея (см. рис. 4.4).

7. Поместить образец с пленкой ЦМД-носителя и датчик Холла в соленоид, подключенный к источнику тока, определить магнитное поле, при котором лабиринтная структура преобразуется в структуру ЦМД и поле коллапса (однородного намагничивания).

### 4.4. Содержание отчета

1. Цели работы.

2. Краткие теоретические сведения, основные расчетные формулы и зависимости.

3. Методики определения магнитных характеристик и наблюдения доменной структуры и схемы лабораторных макетов.

4. Экспериментальные данные и графические зависимости.

5. Результаты вычислений  $H_c$ ,  $B_s$ ,  $B_r$ , коэффициента квадратичности  $\alpha$  и размеров ЦМД исследуемых материалов.

6. Выводы по работе.

### 4.5. Контрольные вопросы

1. Чем определяется намагниченность вещества?

2. Какими параметрами характеризуются магнитные материалы?

3. Что представляет собой дисперсия магнитной проницаемости?

4. Какими причинами обусловлен магнитный гистерезис?

5. Чем определяется форма петли гистерезиса магнитного материала?

6. Что представляет собой эффект Томсона?

7. Что представляет собой эффект Фарадея?

8. Какие материалы относятся к магнитомягким?
9. Какие материалы применяются в диапазоне радиочастот и СВЧ?
10. Что представляют собой ферриты и магнитодиэлектрики?

## Лабораторная работа № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРОВАНИЯ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ КРЕМНИЯ И ВРЕМЯ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

**Цель работы:** ознакомление с основными электрофизическими характеристиками полупроводниковых материалов и методами их измерения, измерение времени жизни неравновесных носителей заряда, удельного сопротивления и определение типа проводимости кремниевых пластин после ионной имплантации донорных и акцепторных примесей.

#### 5.1. Краткие теоретические сведения

К полупроводниковым относятся материалы, которые имеют ширину запрещенной зоны от 0,005 до 6 эВ, промежуточную относительно проводников и диэлектриков электропроводность и сильную чувствительность электрических свойств к внешним воздействиям и примесям. Полупроводники можно классифицировать:

- по виду и ширине запрещенной зоны: с прямой и непрямой зоной, узкозонные, широкозонные и др.;
- по составу: элементарные и химические соединения;
- по кристаллической структуре: монокристаллические, поликристаллические, аморфные (стеклообразные);
- по химическим свойствам: неорганические и органические;
- по проводимости: собственные и примесные (донорные и акцепторные), вырожденные и др.

Полупроводниковыми свойствами обладают такие элементы как кремний, германий, селен, теллур, серое олово ( $\alpha$ -Sn), алмаз, йод. Среди полупроводниковых соединений важное место занимают соединения типа  $A^3B^5$  (арсенид галлия GaAs, фосфид галлия GaP, фосфид индия InP, антимонид индия InSb, нитрид алюминия AlN, нитрид бора BN и т. п.), типа  $A^4B^4$  (например, карбид кремния SiC), типа  $A^2B^6$  (селенид цинка ZnS, теллурид кадмия CdTe и др.). Полупроводниковые свойства присущи также тройным и четверным соединениям и твердым растворам ( $\text{CuInS}_2$ , GaAlAsP, AlGaAsSb,  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ ,  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  и т. п.). К полупроводникам относятся многие окислы:  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ , MnO, NiO, некоторые органические соединения (нафталин, фталоцианин) и большое число стеклообразных материалов, например, халькогенидные стекла  $\text{As}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{As}_2\text{Te}_3$ , некоторые полимеры и пластмассы.

К основным электрофизическим свойствам полупроводников относятся ширина запрещенной зоны  $\Delta E_g$ , удельное объемное сопротивление  $\rho_v$ , удельная электропроводность  $\gamma$ , концентрация собственных носителей заряда,

концентрация примесных носителей заряда, подвижность носителей заряда  $\mu$ , температурный коэффициент удельного сопротивления, время жизни неравновесных носителей  $\tau$ , тип проводимости и др.

Ширина запрещенной зоны  $\Delta E_g$  – это энергия, которую необходимо сообщить валентному электрону, чтобы он покинул химическую связь, перешел из валентной зоны в зону проводимости и стал свободным носителем заряда. Как правило, ширина запрещенной зоны больше у тех полупроводников, которые имеют большую температуру плавления.

Удельная электропроводность  $\sigma$  характеризует способность материала проводить электрический ток. Для полупроводников она состоит из электронной и дырочной составляющих и равна

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p, \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}, \quad (5.1)$$

где  $n$  и  $\mu_n$ ,  $p$  и  $\mu_p$  – концентрации и подвижности электронов и дырок соответственно;  $e$  – заряд электрона ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл). Удельное сопротивление обратно пропорционально удельной проводимости.

В собственных (беспримесных) полупроводниках при любой температуре  $T$ , К, концентрации свободных электронов и дырок приблизительно одинаковы и равны:

$$n_i \approx p_i = \sqrt{N_C \cdot N_V} \cdot \exp(-E_g/2KT), \quad (5.2)$$

где  $N_C$  и  $N_V$  – плотности состояний у дна зоны проводимости и потолка валентной зоны соответственно;  $K$  – постоянная Больцмана.

Тип проводимости, удельное сопротивление, подвижность носителей и другие характеристики полупроводниковых материалов очень чувствительны к наличию примесей. В зависимости от вида примесей и концентрации эти электрофизические параметры могут изменяться в тысячи и даже миллионы раз.

В примесных полупроводниках с электронной ( $n \gg p$ ) и дырочной ( $p \gg n$ ) проводимостью  $np = n_i p_i$  и

$$n = \sqrt{N_C \cdot N_d} \cdot \exp(-E_d/2KT), \quad (5.3)$$

$$p = \sqrt{N_V \cdot N_a} \cdot \exp(-E_a/2KT), \quad (5.4)$$

где  $N_d$ ,  $E_d$  и  $N_V$ ,  $E_a$  – концентрации и энергии ионизации донорной и акцепторной примесей соответственно.

Легирование (внедрение) примеси проводят как в процессе выращивания слитка кремния методом вытягивания из расплава (по Чохральскому) или зонной плавки, так и в уже готовые пластины. В последнем случае это может осуществляться путем выращивания тонкого эпитаксиального слоя, методами диффузии и ионной имплантации.

Подвижность носителей заряда  $\mu$  – это параметр, который характеризует скорость перемещения носителей в постоянном электрическом поле

напряженностью 1 В/м. Подвижность определяется интенсивностью рассеяния носителей заряда и зависит от концентрации и зарядового состояния примесей, дефектности кристаллической решетки и температуры.

Ширину запрещенной зоны определяют из зависимости  $\ln \sigma$  от обратной температуры в области собственной проводимости (рис. 5.1). Тангенс угла наклона  $\alpha$  этой зависимости дает значение  $\Delta E_g$ .

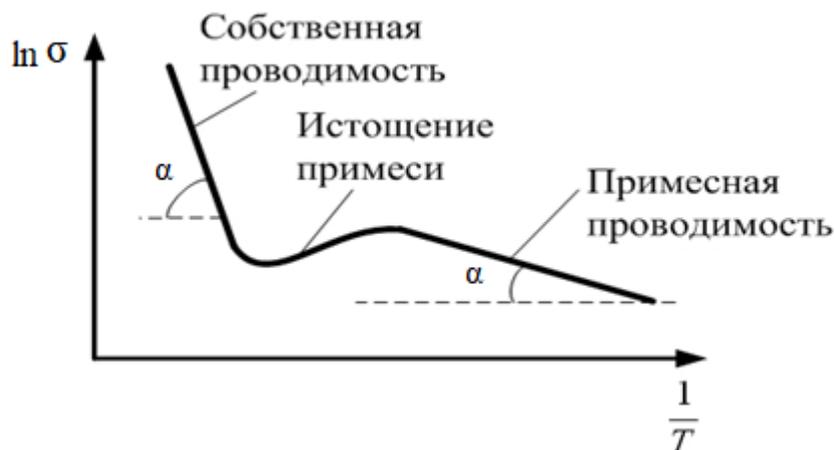


Рис. 5.1. Зависимость концентрации носителей заряда от температуры в примесном полупроводнике

Концентрации и подвижности носителей заряда, а также энергии ионизации и концентрации донорных и акцепторных примесей определяют по температурным зависимостям ЭДС Холла и другими методами.

Полная концентрация свободных носителей в полупроводнике определяется одновременно протекающими процессами генерации и рекомбинации. Рекомбинация может быть межзонной, через рекомбинационные уровни и уровни прилипания, но в любом случае происходит аннигиляция электрона и дырки, т. е. уменьшение количества свободных носителей. При медленных тепловых процессах скорости генерации и рекомбинации выравниваются при некоторой постоянной концентрации, называемой равновесной. В условиях дополнительного возбуждения: облучение светом, бомбардировка различными частицами, вызывающими ионизацию и т. п., а также инжекции носителей через контакт появляются избыточные или неравновесные носители заряда.

Процессы образования равновесных и неравновесных носителей принципиально отличаются. Последние образуются не в результате электрон-решеточных взаимодействий, а за счет передачи энергии непосредственно валентным или находящимся на примесных уровнях электронам. При этом концентрация неравновесных носителей может быть распределена неравномерно по объему, а сами они не находятся в тепловом равновесии с кристаллической решеткой. Избыточная энергия, передаваемая электрону, в дальнейшем быстро рассеивается на дефектах решетки и становится, как и подвижность, сравнимой с энергией равновесных носителей.

Среднее время жизни  $\tau$  неравновесных электронов и дырок служит характеристикой их состояния. Оно определяется, например для электрона, как время между моментом его генерации и моментом захвата дыркой и зависит в первую очередь от скорости рекомбинации избыточных носителей. Для полупроводниковых приборов, особенно импульсных и высокочастотных, необходимо, чтобы время жизни неравновесных носителей было минимальным, так как оно определяет время переключения прибора, т. е. его рабочую частоту. Поэтому полупроводник иногда легируют примесями, образующими рекомбинационные уровни в запрещенной зоне с большим сечением захвата носителей, например золотом.

Одним из неравновесных процессов в полупроводнике является фотопроводимость, заключающаяся в изменении его проводящих свойств под действием электромагнитного излучения. В большинстве случаев облучение полупроводника светом сопровождается увеличением его электропроводности, что объясняется ростом концентрации свободных носителей.

Образование неравновесных носителей при воздействии квантов света обусловлено:

- ионизацией электронов донорных примесей. При этом они переходят в зону проводимости, увеличивая концентрацию электронов проводимости;
- возбуждением электронов, находящихся в валентной зоне с переводом их на акцепторные уровни. Тем самым создаются свободные дырки в валентной зоне и увеличивается дырочная проводимость полупроводника;
- переводом электронов из валентной зоны в зону проводимости, что создает одновременно подвижные дырки и свободные электроны.

В первый момент после включения света в единице объема в каждую секунду создается  $g$  свободных электронов. Нарастание числа неравновесных носителей  $\Delta n$  будет идти по закону

$$\frac{d\Delta n}{dt} = g. \quad (5.5)$$

Рекомбинационные процессы, которые растут пропорционально числу избыточных носителей, постепенно уравнивают процессы генерации. Число фотоэлектронов, рекомбинирующих в единицу времени, равно  $\Delta n/\tau$  и уравнение (5.5) с учетом рекомбинации записывается как

$$\frac{d\Delta n}{dt} = g - \frac{\Delta n}{\tau}. \quad (5.6)$$

Решение этого дифференциального уравнения имеет вид

$$\Delta n = \Delta n_{ст} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (5.7)$$

где  $\Delta n_{ст} = g \cdot \tau$  некоторая стационарная концентрация избыточных фотоэлектронов. А стационарная фотопроводимость  $\Delta \sigma_{ст} = e \mu g \tau$ .

Как видно из (5.7),  $\Delta n$  асимптотически приближается к своему стационарному значению  $\Delta n_{ст}$ . Поэтому величину  $\tau$  называют также временем релаксации для фотопроводимости.

После прекращения воздействия света генерация электронов прекращается и концентрация  $\Delta n$  за счет процесса рекомбинации убывает до нуля по экспоненциальному закону:

$$\Delta n = \Delta n_{ст} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5.8)$$

и полупроводник возвращается в исходное состояние, характеризуемое равновесной концентрацией электронов.

На основании измерения фотопроводимости имеется несколько способов определения концентрации и времени жизни неравновесных носителей заряда. Так, способ подвижного светового зонда основан на том, что падающий на поверхность полупроводника пучок света создает в некотором объеме избыточную неравновесную концентрацию неосновных носителей, которая спадает с увеличением расстояния по экспоненциальному закону.

Таким образом, полная кривая изменения проводимости при освещении полупроводника прямоугольными световыми импульсами имеет согласно (5.7) и (5.9) вид, представленный на рис. 5.2.

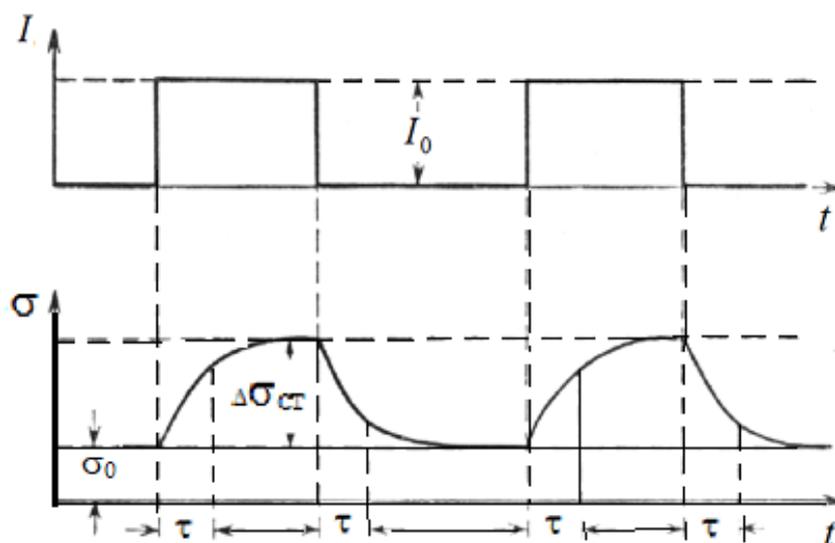


Рис. 5.2. Изменение проводимости при освещении полупроводника прямоугольными импульсами света ( $I_0$  и  $\sigma_0$  – амплитуда импульсов и темновая проводимость соответственно)

Измеряя разность потенциалов различных точек поверхности образца относительно освещенного участка, можно определить расстояние, соответствующее диффузионной длине  $L$ , т. е. точку, в которой разность потенциалов уменьшается в  $e^{(2,73)}$  раз по сравнению с освещенным участком. Тогда время жизни находят из простого выражения:

$$\tau = \frac{L^2}{D}, \quad (5.9)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии неравновесных носителей.

## 5.2. Порядок выполнения работы

Для измерения удельного объемного сопротивления полупроводников существует ряд бесконтактных и контактных методов. Первые реализуются без механического контакта между измеряемым образцом и средством измерения. К ним относятся методы вихревых токов, плазменного резонанса, поглощения СВЧ-энергии и наиболее простые – емкостный и индуктивный методы. Для измерения  $\rho_v$  индуктивным методом применяют катушку индуктивности, по которой протекает переменный ток. Исследуемый образец помещают внутрь катушки или прижимают последнюю к поверхности образца. Образец влияет на индуктивность катушки и по характеристикам протекающего через нее тока можно определять электрические свойства образца. В емкостном методе при помещении полупроводникового образца в колебательный контур измеряется добротность контура. Погрешность измерения составляет 5–20 %.

Однако наибольшее распространение получили контактные методы измерения. Исторически одним из первых способов измерения  $\rho_v$  был двухзондовый метод. На торцевых гранях образца правильной геометрии, например в виде прямоугольного параллелепипеда или цилиндра, создают омические контакты. Через эти контакты пропускают ток. На одной из поверхностей образца вдоль линий тока устанавливают два контакта в виде металлических иглонок – зондов. Для однородного образца удельное сопротивление равно

$$\rho_v = U_{12}S / I_s, \text{ Ом}\cdot\text{м}, \quad (5.10)$$

где  $I$  – сила тока, А;

$U_{12}$  – разность потенциалов между зондами, В;

$S$  – расстояние между зондами, м;

$s$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>.

Можно также измерить сопротивление образца  $R$  и, зная его геометрические размеры, определить  $\rho_v$ :

$$\rho_v = RS / L, \text{ Ом}\cdot\text{м}, \quad (5.11)$$

где  $L$  – длина образца, м.

Погрешность двухзондового метода определяется в основном переходным сопротивлением омических контактов.

Существуют также одно-, трех-, пяти- и шестизондовые методы, методы встречных зондов и Ван дер Пау. Однако наибольшее практическое

применение получил четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления. Кроме высоких метрологических показателей преимущество четырехзондового метода состоит в том, что:

- не требуется создания омических контактов;
- возможно измерение удельного объемного сопротивления образцов самой разнообразной формы и размеров, а также  $\rho_v$  отдельных слоев полупроводниковых структур.

Основное условие его применения – наличие плоской поверхности, линейные размеры которой превосходят линейные размеры системы зондов. Схема устройства для измерения  $\rho_v$  четырехзондовым методом приведена на рис. 5.3.

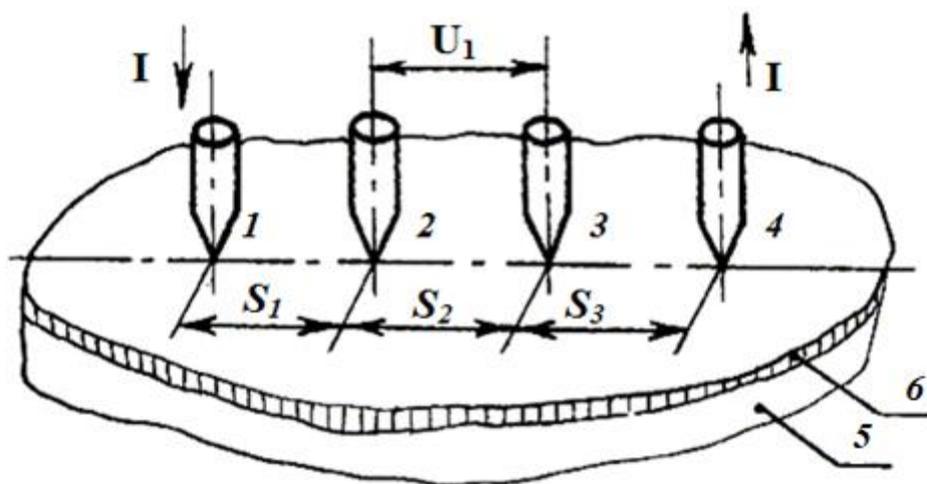


Рис. 5.3. Схема измерения  $\rho_v$  четырехзондовым методом:

1, 4 – токовые; 2, 3 – потенциальные зонды; 5 – полупроводниковая подложка;  
6 – легированный слой

Точность этого метода сильно зависит от расстояния между зондами. Обычно оно берется равным 1,5–0,5 мм, а для более точных измерений – 0,25 мм. Общая погрешность метода – 10–20 %. На нее влияют также отклонения формы образца от условно принятой прямоугольной, точность изготовления контактной головки, геометрические размеры образца, состояние его поверхности, величины переходного сопротивления между металлическим зондом и поверхностью полупроводника и др. Значительно снижается точность измерений при малой толщине образцов.

Используемый в работе прибор ИУС-3 предназначен для измерения удельного поверхностного сопротивления однородных полупроводниковых пластин и монокристаллических пленок толщиной от 0,5 до 100 мкм, нанесенных на полупроводниковые подложки противоположного типа проводимости или на изолированные подложки, резистивных и металлических пленок на изолированных подложках толщиной не более 1 мм и диаметром не более 60 мм в диапазоне от 0,1 Ом/□ до 99,9 кОм/□.

Что такое удельное поверхностное сопротивление поясним на примере участка пленки прямоугольного сечения. Ее сопротивление, замеренное в направлении, параллельном поверхности (рис. 5.4), можно выразить формулой

$$R = \rho_v L / d b, \quad (5.12)$$

где  $\rho_v$  – удельное объемное сопротивление материала;

$d$  – толщина;

$L$  и  $b$  – соответственно длина и ширина участка пленки.

Если  $L = b$ , тогда  $R = \rho_v / d = \rho_{\square}$ . Видно, что сопротивление квадрата не зависит от его размеров, а определяется удельным объемным сопротивлением и толщиной пленки. Если толщина пленки или полупроводниковой пластины  $d$  известна, то удельное объемное сопротивление легко определить, зная удельное поверхностное сопротивление:

$$\rho_v = \rho_{\square} d, \quad (5.13)$$

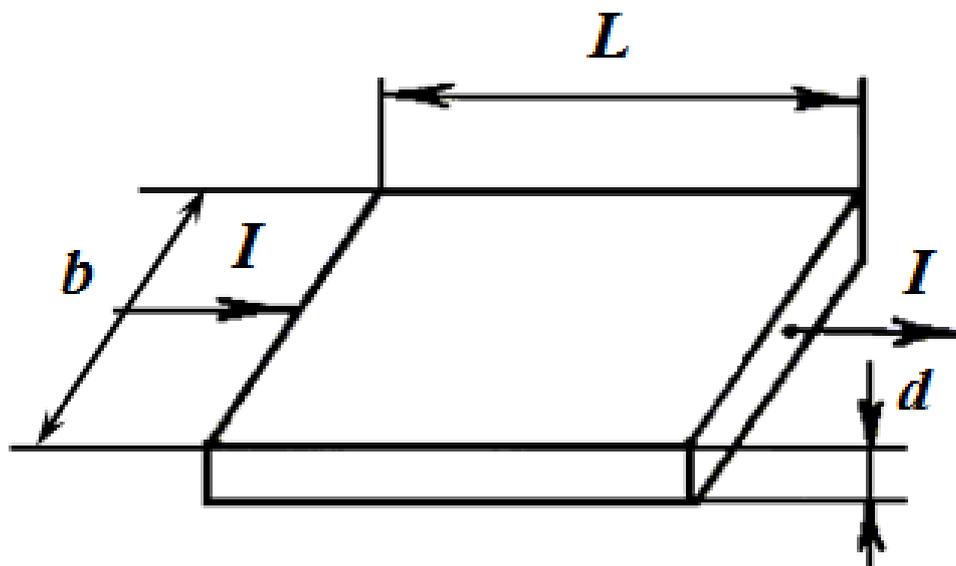


Рис. 5.4. Пример к понятию удельного поверхностного сопротивления

При измерениях  $\rho_{\square}$  прибором ИУС-3 через два внешних контакта 1 и 4 пропускается переменный ток, амплитуда которого изменяется при переключении диапазонов в пределах от 0,23 мкА (на 10-м диапазоне) до 23 мкА (на 1-м диапазоне). Ток создает в образце определенное распределение потенциала, зависящее от расстояния между контактами, тока  $I$ , проходящего через внешние контакты, и удельного поверхностного сопротивления образца. Затем находится отношение амплитуд напряжения  $U$ , возникающего между внутренними контактами 2 и 3, и тока  $I$  внешних контактов 1 и 4. Величина удельного поверхностного сопротивления образца  $\rho_{\square}$  определяется выражением

$$\rho_{\square} = 4,532U / I. \quad (5.14)$$

В данной работе используют метод определения времени жизни по кривым нарастания и спада сигнала фотопроводимости при освещении кремниевой пластины импульсами прямоугольной формы (рис. 5.5).

При  $\Delta t = \tau$  на участке нарастания концентрации фотоэлектронов из выражения (5.7) следует

$$\Delta n = \Delta n_0(1 - 1/e) \approx 0,63 n_0, \quad (5.15)$$

а на участке спада из (5.8)

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-t/\tau} = \Delta n_0 / e \approx 0,37 n_0. \quad (5.16)$$

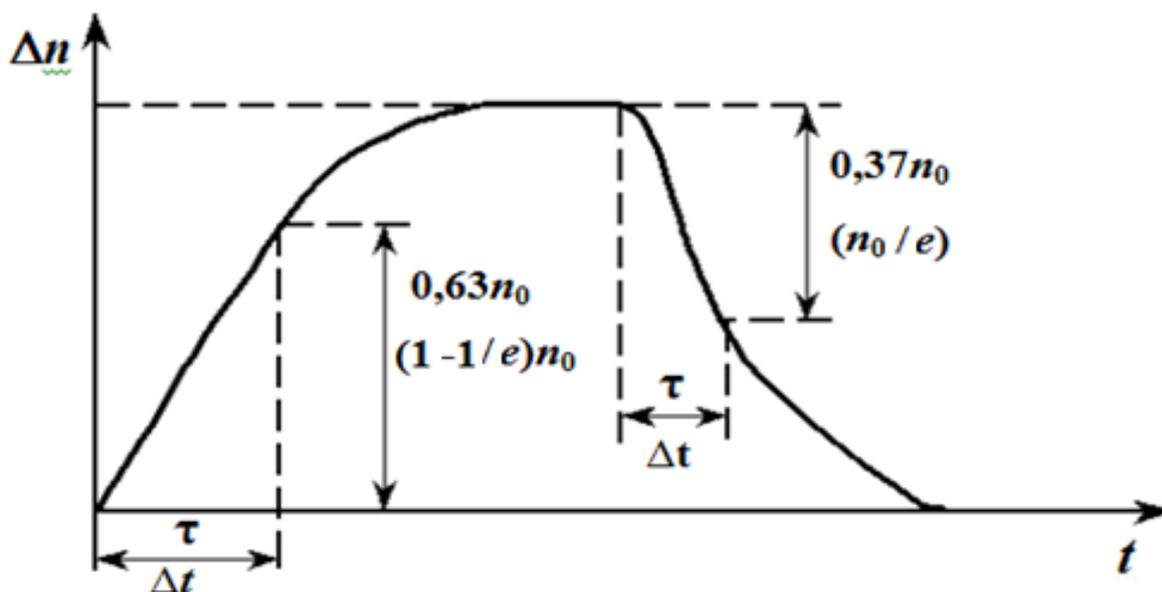


Рис. 5.5. Определение  $\tau$  по кривым нарастания и спада сигнала фотопроводимости

На рис. 5.6 приведена схема макета для измерения времени жизни неравновесных носителей. Для освещения образца используется гелиево-неоновый лазер с длиной волны 0,628 нм. Для модуляции светового потока установлен диск с отверстием, вращаемый мотором. В установившемся режиме частота модуляции составляет 1000 Гц. Промодулированный в виде прямоугольных импульсов световой поток падает на образец, который последовательно включен в цепь, состоящую из стабилизированного источника питания и нагрузочного сопротивления  $R_H$ . Поскольку  $R_H$  значительно меньше сопротивления образца, падение напряжения на нем, пропорциональное сигналу фотопроводимости, подается на осциллограф.

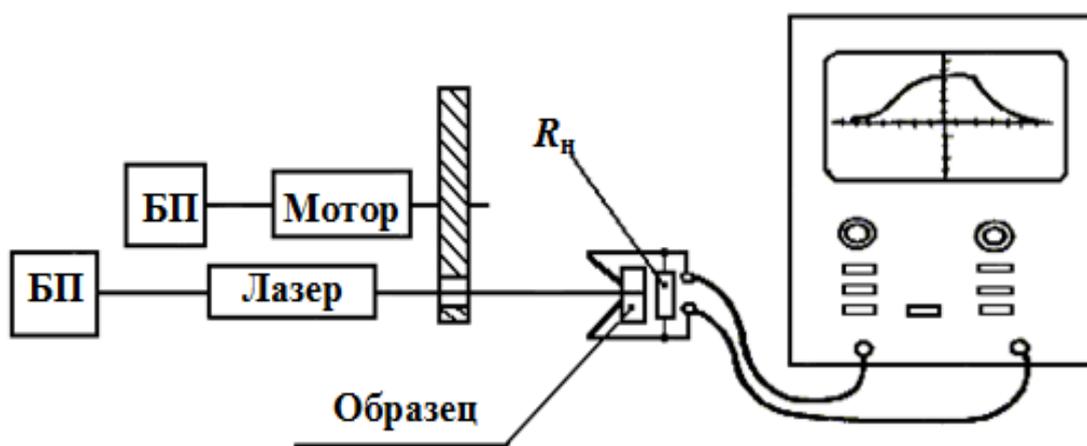


Рис. 5.6. Схема лабораторного макета для измерения времени жизни неравновесных носителей заряда

Во многих практических случаях важно знать тип проводимости полупроводника. Для его определения в настоящее время широко используются методы термозонда и вольт-амперной характеристики точечного контакта.

Метод термозонда основан на возникновении ЭДС между участками полупроводника с перепадом температуры, так как на нагретом участке происходит обеднение основными носителями заряда. Два зонда (рис. 5.7), расположенные на расстоянии 2–4 мм, прижимаются к поверхности полупроводника. Один из зондов нагревается до температуры 200–400 °С.

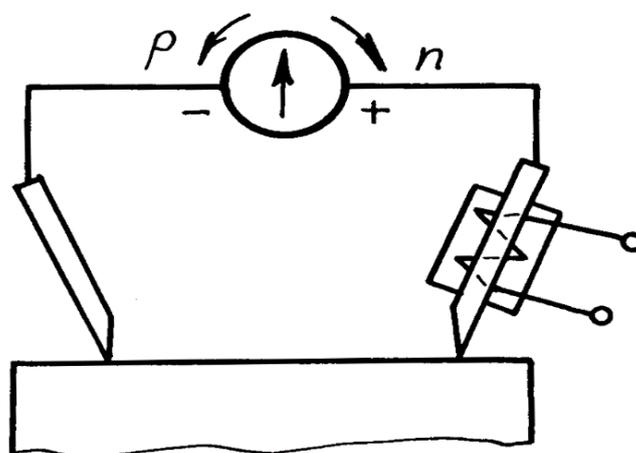


Рис. 5.7. Схема определения типа проводимости полупроводника методом термозонда

По полярности измеряемой термоЭДС определяется тип проводимости. В полупроводнике  $p$ -типа нагреваемый контакт будет иметь отрицательную полярность, а в полупроводнике  $n$ -типа – положительную. Метод особенно удобен для материалов с малым удельным сопротивлением.

Метод точечного контакта основан на возникновении выпрямляющего контакта между зондом из тонкого вольфрамового проводника и чистой

протравленной поверхностью полупроводника. По форме вольт-амперной характеристики можно определить тип проводимости. Метод годится главным образом для материалов с большим удельным сопротивлением.

В настоящей работе используется модернизированный метод точечного контакта. Вольт-амперные характеристики будут строиться по точкам в зависимости от приложенного между полупроводниковой пластиной и контактом напряжения. Для кремния *n*-типа при приложении к точечному контакту положительного потенциала будет течь прямой ток, а для *p*-типа – наоборот.

### 5.3. Оборудование и материалы

1. Наборы кремниевых подложек с различной дозой внедренной примеси.
2. Образец полупроводникового материала правильной геометрической форма с нанесенными торцевыми омическими контактами.
3. Образец пластин кремния различного типа проводимости.
4. Измеритель удельного поверхностного сопротивления ИУС-3.
5. Лабораторный макет установки для определения времени жизни неравновесных носителей заряда.
6. Цифровой вольтметр.
7. Стенд для определения типа проводимости.
8. Штангенциркуль.

### 5.4. Порядок выполнения работы

В данной работе необходимо исследовать зависимость удельного поверхностного сопротивления от дозы  $D$ , мкКл/см<sup>2</sup>, внедренных в кремниевые пластины ионов примеси; определить время жизни неосновных носителей заряда и тип проводимости полупроводника.

1. Получить у лаборанта исследуемые образцы полупроводниковых материалов.

**Внимание:** при работе с образцами соблюдать осторожность, так как они очень хрупки. Не касаться поверхности подложек пальцами!

2. С помощью штангенциркуля и цифрового мультиметра измерить размеры и сопротивление образца правильной геометрической формы.

Рассчитать величину удельного поверхностного сопротивления.

3. С помощью прибора ИУС-3 измерить удельное поверхностное сопротивление образцов ионно-легированного кремния. Построить график зависимости  $\rho_{\square} = f(D)$ .

4. Изучить лабораторный макет и с помощью преподавателя или лаборанта получить на экране осциллографа кинетическую зависимость

сигнала фотопроводимости. Графическим способом определить время жизни неравновесных носителей заряда на участках спада и нарастания.

5. Методом точечного контакта определить тип проводимости образцов полупроводниковых материалов.

### **5.5. Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения, основные расчетные формулы и зависимости.
3. Методики измерений и схемы лабораторных макетов.
4. Экспериментальные данные и графические зависимости.
5. Результаты вычислений.
6. Выводы по работе.

### **5.6. Контрольные вопросы**

1. Привести классификацию полупроводниковых материалов.
2. Каковы основные электрофизические свойства полупроводников?
3. Описать методы измерения удельного сопротивления.
4. Описать методику измерения удельного поверхностного сопротивления четырехзондовым методом.
5. От чего зависит точность измерения сопротивления четырехзондовым методом?
6. Что такое время жизни носителей заряда и на какие характеристики полупроводниковых материалов и структур оно влияет?
7. Какие процессы протекают в полупроводниках при внешних воздействиях?
8. Для чего используется метод подвижного светового зонда?
9. Что и как определяется методом роста и затухания сигнала фотопроводимости?
10. Назвать методы определения типа проводимости.

## Список использованных источников

1. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники : учеб. для вузов. В 2 т. Т. 1: Проводники, полупроводники, диэлектрики / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. – СПб. : Лань, 2015. – 448 с.
2. Павлов, Л. П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов / Л. П. Павлов – М. : Высш. шк., 1987. – 239 с.
3. Марков, В. Ф. Материалы современной электроники : учеб. пособие / В. Ф. Марков, Х. Н. Мухамедянов, Л. Н. Маскаева. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 272 с.
4. Физические измерения в микроэлектронике / В. А. Пилипенко [и др.]. – Минск : БГУ, 2003. – 171 с.
5. Груздев, В. В. Входной и технологический контроль материалов и структур твердотельной электроники / В. В. Груздев, Ю. В. Колковский, Ю. А. Концевой. – М. : Техносфера, 2017. – 197 с.
6. Бонч-Бруевич, В. Л. Физика полупроводников / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1990. – 688 с.
7. Серебряков, А. С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы : учеб. пособие / А. С. Серебряков. – М. : Маршрут, 2005. – 280 с.
8. Конструкционные и электротехнические материалы / В. Н. Бородулин [и др.] ; под ред. В. А. Филикова. – М. : Высш. шк., 1990. – 294 с.
9. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники : учеб. для вузов. В 2 т. Т. 2: Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. – СПб. : Лань, 2015. – 384 с.
10. Костин, П. П. Физико-механические испытания материалов, сплавов и неметаллических материалов / П. П. Костин. – М. : Машиностроение, 1990. – 256 с.
11. Золоторевский, В. С. Механические свойства металлов : учеб. для вузов / В. С. Золоторевский. – 3-е изд. – М. : МИСИС, 1998. – 400 с.
12. Конструкционные и электротехнические материалы : учеб. пособие / В. А. Гольдаде [и др.] ; под ред. В. А. Струка, В. А. Гольдаде. – Минск : РИВШ, 2022. – 536 с.
13. Катаев, В. А. Методы измерений электрических и магнитных свойств функциональных материалов : учеб. пособие / В. А. Катаев. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2010. – 264 с.
14. Стародубцев, Ю. Н. Магнитные материалы : энциклопед. слов.-справ. / Ю. Н. Стародубцев. – М. : Техносфера, 2011. – 664 с.

*Учебное издание*

**Шахлевич Григорий Михайлович**  
**Тумилович Мирослав Викторович**

**МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

ПОСОБИЕ

Редактор *А. Ю. Шурко*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*  
Компьютерная правка, оригинал-макет *В. А. Долгая*

Подписано в печать 15.01.2026. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,53. Уч.-изд. л. 4,5. Тираж 100. Заказ 133.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск