

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов направления подготовки
12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»
очной формы обучения*



Могилев 2024

УДК 681.2
ББК 34.9
Ф50

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «12» декабря 2023 г.,
протокол № 4

Составитель ст. преподаватель Е. Н. Прокопенко

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. О. Парашков

В методических рекомендациях кратко изложены теоретические сведения, необходимые для выполнения лабораторных работ. Рекомендации составлены в соответствии с учебной программой по дисциплине «Физические основы получения информации» для студентов направления подготовки 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» очной формы обучения.

Учебное издание

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2024

Содержание

Введение.....	4
1 Техника безопасности при работе с измерительными приборами	5
2 Исследование акустических методов получения информации.....	6
3 Исследование оптических методов получения информации	13
4 Исследование тепловых методов получения информации.....	17
5 Исследование магнитных методов получения информации	23
6 Исследование электрических методов получения информации.....	27
Список литературы	35

Введение

Информация – понятие, включающее обмен сведениями между людьми, человеком и автоматом, автоматом и автоматом. Получение информации (каких-либо сведений) об окружающем нас мире может происходить в результате общения с окружающими, чтения книг, приема и обработки сигналов, передаваемых по каналам связи и т. д. Основным способом получения количественной информации о том или ином объекте, системе, их состоянии и происходящих в них процессах является способ, связанный с процессом измерения.

Целью изучения дисциплины «Физические основы получения информации» является изучение физических принципов различных видов получения информации в науке и технике; основ взаимодействия физических полей с веществом; физических явлений и эффектов, используемых для получения измерительной и управляющей информации; основных фундаментальных и прикладных положений, лежащих в основе разнообразных приборов, предназначенных для получения информации об окружающем человека мире.

Целью лабораторных работ по данной дисциплине является ознакомление студентов с основными физическими эффектами, используемыми в измерениях, а также со средствами и методами регистрации и преобразования измерительной информации.

1 Техника безопасности при работе с измерительными приборами

Цель работы: ознакомиться с основными правилами по технике безопасности при работе с измерительными приборами.

1.1 Основные теоретические положения

При работе с приборами имеются некоторые общие правила, обеспечивающие безопасную эксплуатацию и охрану труда.

Каждый прибор должен иметь паспорт и инструкцию по эксплуатации, которыми руководствуется обслуживающий персонал. Без изучения инструкции пользоваться приборами, установками и комплексами запрещается. Перед включением в сеть проверяется наличие заземления, а коммутирующие и регулирующие устройства выставляются в исходное состояние.

Работа в лаборатории проводится под наблюдением преподавателя и лаборанта. При этом к лабораторной установке должен быть обеспечен свободный доступ: запрещены загромождение проходов, хождение студентов и посторонних лиц во время занятий.

Приступая к выполнению работы, студент обязан ознакомиться с порядком ее проведения, правилами безопасной работы на данном лабораторном стенде (оборудовании).

Запрещается приступать к выполнению работы до тех пор, пока преподавателем не будет установлено, что студенту известны цель работы, метод ее выполнения, способ обращения с оборудованием, предполагаемые результаты.

Перед включением прибора или аппарата в электросеть необходимо убедиться в исправности заземляющих элементов, качестве изоляции.

Эксплуатация приборов должна производиться только в присутствии преподавателя (лаборанта).

Запрещается трогать оборудование, неиспользуемое в данной работе.

Если до или в ходе работы обнаружена неисправность оборудования, следует прекратить работу, отключить напряжение и сообщить преподавателю или лаборанту о неполадках в работе. Устранять неполадки собственными силами запрещается.

По окончании работ в лаборатории приборы (оборудование) приводятся в первоначальное состояние, инструкции сдаются лаборанту. Должен производиться осмотр всех рабочих мест с обязательным отключением всех цепей питания и освещения.

1.2 Порядок выполнения работы

Ознакомиться с основными правилами по технике безопасности при работе с измерительными приборами.

Контрольные вопросы

- 1 В чем заключаются поражающие факторы электрического тока?
- 2 Почему электрический ток и напряжение электрического тока является основным поражающим фактором?
- 3 Чему равна величина условно безопасного напряжения?
- 4 Почему переменный электрический ток более опасен по сравнению с постоянным?

2 Исследование акустических методов получения информации

Цель работы: ознакомиться с основными методами измерения скорости и затухания ультразвуковых волн, провести экспериментальное исследование различных образцов и обработать результаты измерений.

2.1 Основные теоретические положения

Звуковое поле – одна из форм существования материи, проявляемая в виде кинетической и потенциальной энергии, колеблющихся материальных тел – звуковых волн в твердой, жидкой и газообразной средах, обладающих свойствами упругости формы и объема. Частоты звуковых (слышимых) колебаний находятся в полосе частот от 20 до 20000 Гц. Инфразвуковые, ультразвуковые и гиперзвуковые колебания органом слуха человека не воспринимаются.

Колеблющееся тело, являющееся источником звука, приводит в движение примыкающие к нему частицы упругой среды, которые, в свою очередь, заставляют колебаться соседние с ним частицы. Процесс распространения колебаний в упругой среде называют волной. Направление распространения звуковых волн называют звуковым лучом, а поверхность, соединяющую все точки с одинаковой фазой колебания частиц – фронтом волны. Фронт волны в каждый момент времени перпендикулярен звуковому лучу.

В отличие от твердых тел, где возможно распространение волн как с продольным, так и с поперечным направлением смещения частиц по отношению к направлению распространения волн, в жидкостях и газах волна распространяется только в направлении колебательного движения самих частиц среды. Такой процесс характерен для продольных волн или волн сжатия, представляющих собой последовательность чередующихся сгущений и разрежений частиц среды.

2.1.1 Основные методы измерения скорости ультразвуковых волн. Одной из важных характеристик любых волн является скорость – расстояние, проходимое ими за единицу времени [1].

Существует несколько методов определения скорости распространения звуковых волн. Методы можно подразделить на резонансные, а, импульсные,

оптические (с использованием явления дифракции света на ультразвуке), метод интерферометр и некоторые другие. Наибольшую точность можно получить, используя импульсно-фазовые методы. Оптические методы позволяют измерить скорость волн на гиперзвуковых частотах, вплоть до $10^{11} \dots 10^{12}$ Гц. Точность измерения скорости звука зависит от того, надо ли получить её абсолютные значения, или же можно ограничиться относительными измерениями скорости звука при изменении каких-либо внешних параметров, например, в зависимости от температуры или же в зависимости от наличия примесей.

Импульсный метод измерения скорости распространения ультразвуковых волн предусматривает измерение расстояния S , пройденного ультразвуковым импульсом в материале образца и времени прохождения этого расстояния t . Величина скорости определяется отношением этих величин:

$$V = S / t. \quad (2.1)$$

Определение скорости продольных волн. При эхоимпульсном методе УЗ-импульс вводится в образец с плоскопараллельными гранями через одну из них, отражается от противоположной грани, идет в обратном направлении и регистрируется преобразователем (рисунок 2.1, а). Скорость волн вычисляется по известной формуле

$$V = 2d / t, \quad (2.2)$$

где d – толщина образца;

t – время между первым и вторым донными импульсами.

Определение скорости поперечных волн. Поперечные волны возбуждаются при помощи наклонных преобразователей, использующих явление трансформации продольных волн в поперечные на границе раздела «призма – образец», происходящее при углах падения, отличных от нуля. Поэтому импульс поперечных волн, возбужденных таким образом, отражаясь от противоположной поверхности, не регистрируется тем же преобразователем. В связи с этим необходимо луч поперечной волны направить на какой-либо отражатель, например, уголкового. В качестве последнего можно использовать прямые углы образца (рисунок 2.1, б). Время, измеряемое в этом случае, включает время распространения продольной волны в призме t_n и время распространения поперечной волны в образце t_1 и t_2 , идущей от источника ввода до отражателя. Для того чтобы выделить время распространения импульса поперечных волн в чистом виде, необходимо, по крайней мере, два измерения (см. рисунок 2.1, б). В положении 1 время прохождения импульса определяется по формуле

$$t_{10} = t_n + t_1 = \frac{2l_3}{c_n} + \frac{2L_1}{c_t}, \quad (2.3)$$

где c_n – скорость продольной волны в призме;

c_t – скорость поперечной волны в образце;

l_3 – расстояние, проходимое импульсом в призме;
 L_1 – расстояние, проходимое импульсом в образце.

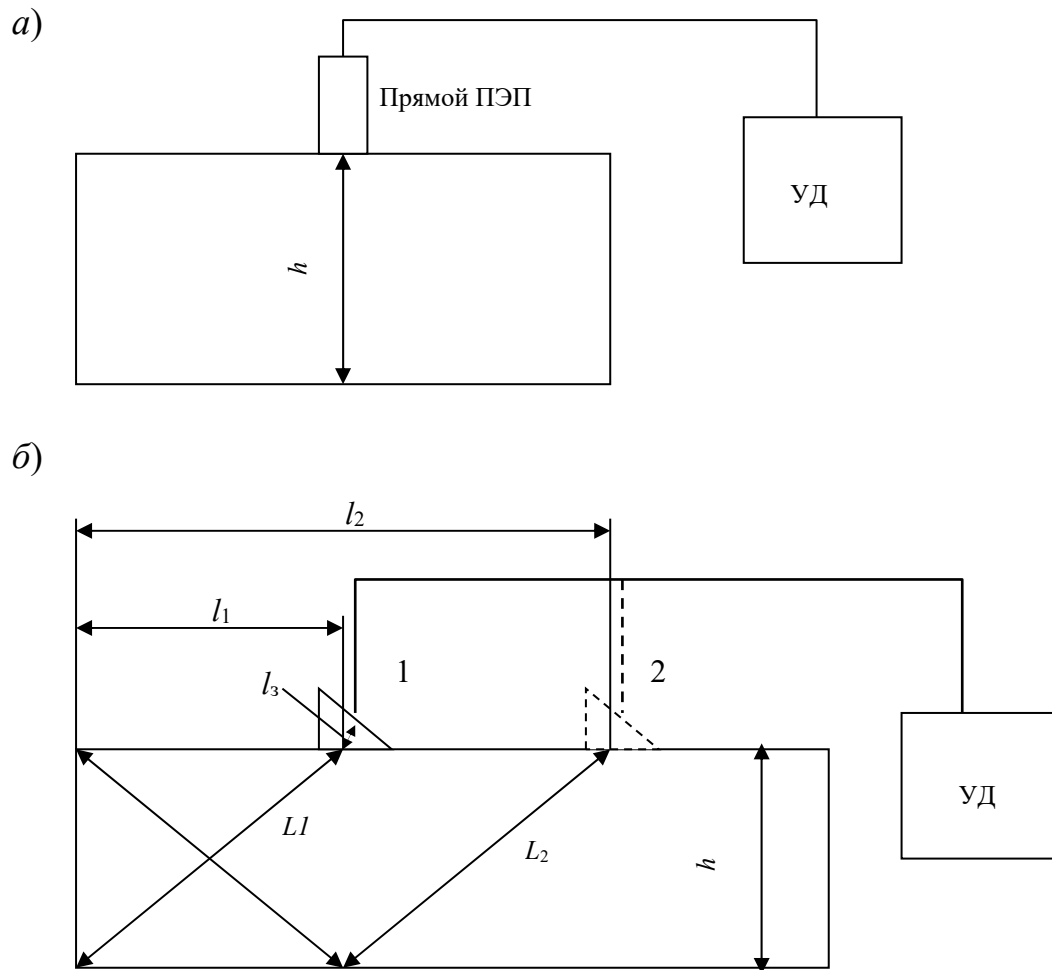


Рисунок 2.1 – Схемы проведения измерений

В положении 2

$$t_{20} = t_n + t_2 = \frac{2l_3}{c_n} + \frac{2L_2}{c_t}, \quad (2.4)$$

где L_2 – расстояние, проходимое импульсом в образце в положении 2.

Вычитая из (2.4) формулу (2.3), получим

$$t_{20} - t_{10} = t_2 - t_1 = \frac{2(L_2 - L_1)}{c_t}. \quad (2.5)$$

Измеряя l и h с учетом геометрии образца, а также t_1 и t_2 , можно рассчитать по формуле (2.5) значение скорости поперечных волн.

2.1.2 *Определение затухания ультразвуковых волн.* Затухание ультразвука – это уменьшение амплитуды и, следовательно, интенсивности звуковой волны по мере ее распространения в среде. Затухание, обусловленное поглощением и рассеянием, описывается экспоненциальным законом убывания амплитуды с расстоянием. Если без учета затухания уравнение распространения волны в направлении координаты имеет вид:

$$U = U_0 \exp(-j\omega - kx), \quad (2.6)$$

то с учетом затухания

$$U = U_0 \exp(-\delta x) \exp(-j\omega - kx), \quad (2.7)$$

где δ – коэффициент затухания.

С учетом расхождения волны в сферической системе координат уравнение имеет вид:

$$U = U_0 \frac{G}{r} \exp(-\delta r) \exp(-j\omega t - kr), \quad (2.8)$$

где G – размерный коэффициент, м.

Здесь полагается, что начало координат совпадает с эффективным акустическим центром излучателя – точкой, из которой кажутся расходящимися волны для наблюдателя в дальней зоне. Положение этой точки не совпадает с местом контакта преобразователя и материала. Положение ее можно определить, зная частоту колебаний f , скорость распространения волн C и диаметр преобразователя D . Для преобразователей поршневого типа граница ближней зоны определяется соотношением

$$L = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 f}{4C}, \quad (2.9)$$

где λ – длина волны ультразвука.

Половина угла раскрытия первого минимума диаграммы направленности в дальней зоне определяется формулой

$$\theta = \arcsin \frac{1,22\lambda}{D} = \arcsin \frac{1,22C}{Df}. \quad (2.10)$$

Ближняя зона не может быть использована для измерения затухания, т. к. в ней наблюдаются интерференционные явления. Поэтому толщина образцов должна быть больше протяженности ближней зоны $h > L$.

Метод определения затухания основан на измерении амплитуды импульса при прохождении некоторого расстояния ($r_2 - r_1$). Необходимо измерить

отношение амплитуд U_1 на расстоянии r_1 и U_2 на расстоянии r_2 и вычислить δ по формуле (2.8):

– для расстояния r_1

$$U_1 = U_0 \frac{G}{r_1} \exp(-\delta r_1) \exp(-j\omega t_1 - kr_1); \quad (2.11)$$

– для расстояния r_2

$$U_2 = U_0 \frac{G}{r_2} \exp(-\delta r_2) \exp(-j\omega t_2 - kr_2). \quad (2.12)$$

Разделив (2.11) на (2.12), имеем

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{r_2}{r_1} \exp(\delta(r_2 - r_1)). \quad (2.13)$$

Множители $\exp(-j\omega t_1 - kr_1)$, $\exp(-j\omega t_2 - kr_2)$ не влияют на амплитуду импульса, т. к. каждому r соответствует t , при котором $\exp(-j\omega t - kr) = 1$.

Преобразуем (2.13):

$$\delta = \frac{\ln \frac{U_1}{U_2} - \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2 - r_1}. \quad (2.14)$$

Формула (2.14) позволяет вычислить δ при любых, но различных r_1 и r_2 .

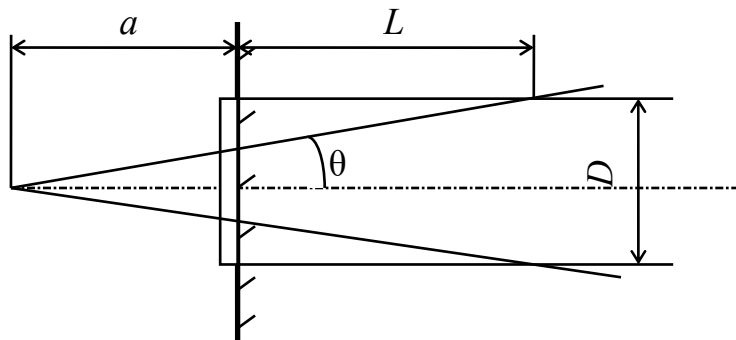


Рисунок 2.2 – Звуковое поле дискового преобразователя

Если для измерений использовать первый и второй донные импульсы, то для образца толщиной h

$$r_1 = 2a + 2h; \quad (2.15)$$

$$r_2 = 2a + 4h; \quad (2.16)$$

$$r_2 - r_1 = 2h, \quad (2.17)$$

где a – расстояние от эффективного акустического центра до поверхности ввода.

Интерферометрические методы. По конструкции интерферометры для измерения коэффициента поглощения не отличаются от применяемых при измерении скорости звука, однако в этом случае предъявляются более жесткие требования к параллельности преобразователей, однородности звукового поля и малого влияния дифракционных и волноводных явлений. Даже при выполнении этих условий результаты получаются только для веществ с большим поглощением, например, для газов.

Интерферометр для измерения поглощения представляет собой цилиндр, заполненный исследуемой средой; с одной его стороны помещается излучатель звука, а с другой – подвижный отражатель, причем в процессе измерения расстояние между излучателем и отражателем изменяется.

Резонансные методы измерения коэффициента поглощения. Эти методы часто применяют в твердых телах с малыми механическими потерями. Коэффициент поглощения находят по резонансным частотным характеристикам образца в форме цилиндра или бруска, возбуждаемого на основной частоте или ее гармонике.

2.2 Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы используются: типовые ультразвуковые дефектоскопы, ультразвуковые преобразователи, образцы для исследований.

2.3 Порядок выполнения работы

2.3.1 Изучить устройство и принцип действия серийного ультразвукового дефектоскопа.

2.3.2 Провести измерения скорости в продольных образцах равной толщины из различных материалов.

Прозвучить образцы и определить время прохождения импульсного сигнала в каждом образце путем измерения времени между первым и вторым донными отражениями. Измерить толщины каждого образца и данные измерений внести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Данные измерений

Материал	Номер измерения	Толщина образца h , мм	Время t , мкс	Скорость c_l , м/с	$c_l - \bar{c}_l$	$(c_l - \bar{c}_l)^2$
N1	1					

2.4 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, оборудование, используемое для выполнения работы, схемы исследования, результаты проведения исследований, расчеты, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Какие свойства и характеристики материалов определяют значения скоростей распространения ультразвука?
- 2 Какие методы измерения скорости звука используются в практике?
- 3 В чем отличие фазовой и групповой скоростей?
- 4 Что такое дисперсия скорости звука?
- 5 Из каких основных структурных элементов состоят приборы для измерения скорости ультразвуковых волн?
- 6 В чем сущность импульсного метода измерения затухания УЗК?

3 Исследование оптических методов получения информации

Цель работы: изучить основы измерений оптическими методами, овладеть практическими навыками работы с простейшим электронным микроскопом.

3.1 Основные теоретические положения

Оптические методы получения информации основаны на анализе взаимодействия оптического излучения с объектом. Информационными параметрами оптического излучения являются пространственно-временные распределения его амплитуды, частоты, фазы, поляризации и степени когерентности.

Для получения измерительной информации используют измерение этих параметров при взаимодействии оптического излучения с объектом исследования в соответствии с явлениями интерференции, дифракции, поляризации, преломления, поглощения, рассеяния, дисперсии света, а также изменение характеристик самого объекта под действием света [1, 2].

Наиболее простой метод – визуально-оптический. Он основан на получении увеличенного изображения объекта исследования на экране или в оптической системе для наблюдения непосредственно глазом оператора с последующим его сравнением с изображением, принятым за эталонное, или измерением. Для реализации этого метода применяются проекторы и микроскопы.

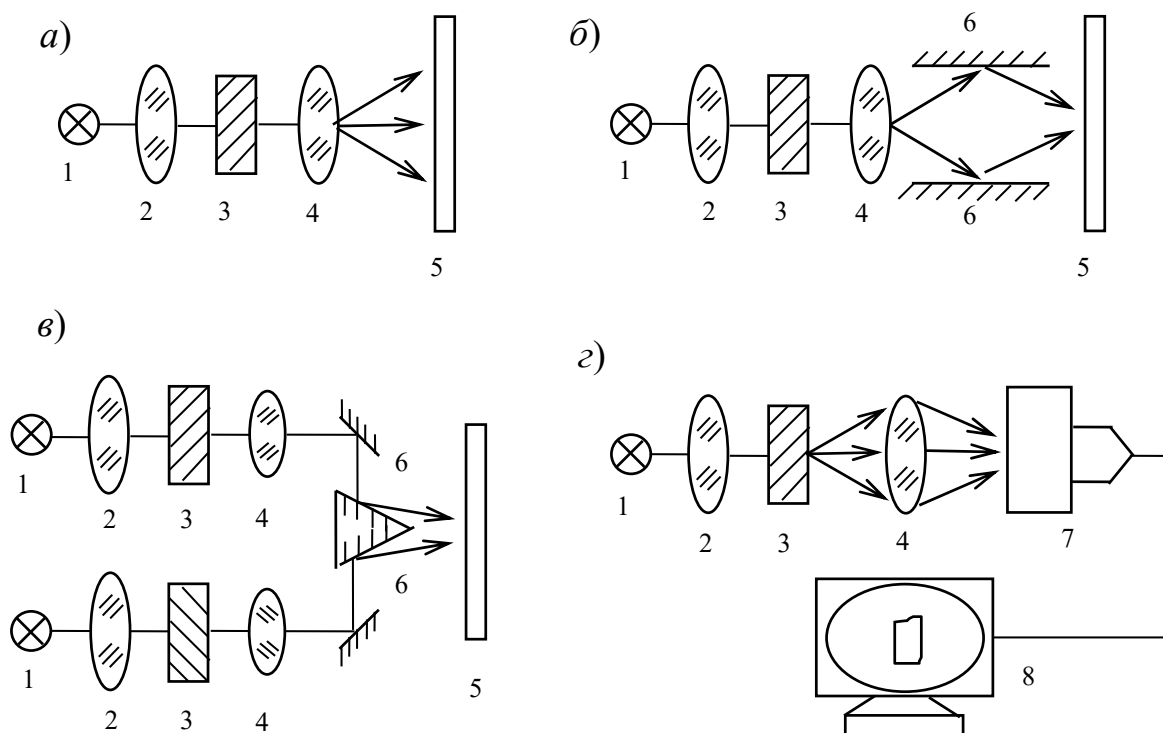
С помощью проекторов контролируют инструмент, объекты сложной формы и т. д. Существуют два основных способа проецирования: в отраженных и проходящих лучах. Большинство современных проекторов обладают измерительными функциями. Измерения производят путем сравнения изображения контролируемого изделия с чертежом или шаблоном, выполненном в масштабе

проекции и закрепленным на экране, или при перемещении предметного стола микровинтами до совмещения изображения контуров деталей с меткой на экране. Размер объекта находят как разность соответствующих показателей микровинтов.

Основные типы оптических систем проекторов можно объединить в следующие группы:

- подобного увеличения;
- сведенного изображения;
- совмещенного и стереоскопического изображения;
- светового сечения;
- телевизионные.

На рисунке 3.1 приведены оптические схемы некоторых типов проекторов.



а – подобного увеличения; *б* – сдвоенного изображения; *в* – оптический компаратор; *г* – телевизионный; 1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – объект контроля; 4 – объектив; 5 – экран; 6 – зеркало; 7 – телекамера; 8 – монитор

Рисунок 3.1 – Оптические схемы проекторов

Для измерения линейных размеров микрообъектов широко используются микроскопы. В этих приборах в поле зрения окуляра наряду с изображением объекта находится масштабная сетка или шкала. Посредством сравнения изображения объекта со шкалой определяют размер того или иного геометрического параметра.

Основными элементами современных световых микроскопов являются механическая и оптическая части.

К механической части относятся штатив, тубус, револьверная насадка, коробка микромеханизма, предметный столик, макрометрический и микромет-

рический винты.

Штатив состоит из двух частей: основания и тубусодержателя (колонки). *Основание* микроскопа прямоугольной формы имеет снизу четыре опорные площадки, что обеспечивает устойчивое положение микроскопа на поверхности рабочего стола. *Тубусодержатель* соединяется с основанием и может перемещаться в вертикальной плоскости при помощи макро- и микрометрических винтов. При вращении винтов по часовой стрелке тубусодержатель опускается, при вращении против часовой стрелки – поднимается от препарата. В верхней части тубусодержателя укреплена *головка* с гнездом для монокулярной (или бинокулярной) насадки и направляющей для револьверной насадки. Головка крепится *винтом*.

Тубус – это труба микроскопа, позволяющая поддерживать определенное расстояние между основными оптическими деталями – окуляром и объективом. Вверху в тубус вставляется окуляр. Современные модели микроскопов имеют наклонный тубус.

Револьверная насадка представляет собой вогнутый диск с несколькими гнездами, в которые ввинчиваются три-четыре объектива. Вращая револьверную насадку, можно быстро установить любой объектив в рабочее положение под отверстие тубуса.

Коробка микромеханизма несет с одной стороны направляющую для кронштейна конденсора, а с другой – направляющую для тубусодержателя. Внутри коробки находится механизм фокусировки микроскопа, представляющий собой систему зубчатых колес.

Предметный столик служит для размещения на нем препарата или другого объекта исследования. Столик может быть квадратным или круглым, подвижным или неподвижным. Подвижный столик перемещается в горизонтальной плоскости при помощи двух боковых винтов, что позволяет рассматривать препарат в разных полях зрения. На неподвижном столике для обследования объекта в разных полях зрения препарат перемещают рукой. В центре предметного столика имеется отверстие для освещения снизу лучами света, направляемыми от осветителя. На столике имеются две пружинные *клеммы*, предназначенные для закрепления препарата.

Макрометрический винт (макровинт) служит для предварительной ориентировочной установки изображения рассматриваемого объекта. При вращении макровинта по часовой стрелке тубус микроскопа опускается, при вращении против часовой стрелки – поднимается.

Микрометрический винт (микровинт) используют для точной установки изображения объекта. Микрометрический винт является одной из наиболее легко повреждаемых частей микроскопа, поэтому с ним надо обращаться осторожно – не вращать с целью грубой установки изображения во избежание самопроизвольного опускания тубуса. При полном повороте микровинта тубус передвигается на 0,1 мм.

Оптическая часть микроскопа состоит из основных оптических деталей (объектив и окуляр) и вспомогательной осветительной системы (зеркало и конденсор).

Объективы. Они представляют собой систему линз, заключенных в металлическую оправу, на которой указаны степень увеличения и числовая апертура. Наружная линза, обращенная плоской стороной к препарату, называется фронтальной. Именно она обеспечивает увеличение. Остальные линзы называются коррекционными и служат для устранения недостатков оптического изображения, возникающих при рассмотрении исследуемого объекта.

Окуляр (от лат. *okularis* – глазной) состоит из двух линз – глазной (верхней) и полевой (нижней), заключенных в металлическую оправу. Окуляр служит для увеличения изображения, которое дает объектив. Увеличение окуляра обозначено на его оправе. Существуют окуляры с рабочим увеличением от 4х до 15х.

Конденсор (от лат. *condenso* – уплотняю, сгущаю) состоит из двух-трех короткофокусных линз. Он собирает лучи, идущие от зеркала, и направляет их на объект. При помощи рукоятки, расположенной под предметным столиком, конденсор может перемещаться в вертикальной плоскости, что приводит к увеличению освещенности поля зрения при поднятом конденсоре и уменьшению его при опущенном конденсоре. Для регулировки интенсивности освещения в конденсоре имеется ирисовая (лепестковая) диафрагма, состоящая из стальных серповидных пластинок. При полностью открытой диафрагме рекомендуется рассматривать окрашенные препараты, при уменьшенном отверстии диафрагмы – неокрашенные. Под конденсором расположена *откидная линза* в оправе, используемая при работе с объективами малого увеличения, например, 8х или 9х.

Зеркало имеет две отражающие поверхности – плоскую и вогнутую. Оно закреплено на шарнирах в основании штатива и его можно легко поворачивать. При искусственном освещении рекомендуется пользоваться вогнутой стороной зеркала, при естественном – плоской.

Осветитель выполняет функцию искусственного источника света. Он состоит из низковольтной лампы накаливания, закрепляющейся на штативе, и понижающего трансформатора. На корпусе трансформатора имеется рукоятка реостата, регулирующего накал лампы и тумблер для включения осветителя

Цифровой микроскоп Dino-Lite применяется для изучения непрозрачных поверхностей различных объектов, а также для их фотографирования и видеозаписи. Модель подключается к компьютеру при помощи USB-кабеля, изображение выводится на экран.

Программное обеспечение Dino Capture состоит из нескольких разделов:

- горизонтальное меню;
- меню инструментов работы с изображениями;
- горизонтальное меню предварительного просмотра изображения;
- панель инструментов;
- панель инструментов предварительного просмотра изображения.

3.2 Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы используются: электронный микроскоп, образцы, содержащие оптические волокна различного диаметра.

3.3 Порядок выполнения работы

3.3.1 Изучить основные теоретические положения, устройство и принцип действия микроскопа.

3.3.2 Измерить диаметры оптических волокон в образцах.

3.3.3 Определить толщину образцов.

3.4 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, перечень используемого оборудования, результаты измерений, выводы.

Контрольные вопросы

1 На каких физических принципах основаны оптические методы контроля геометрических параметров?

2 Устройство и принцип действия проекторов.

3 Устройство и принцип действия микроскопов.

4 Методы измерения геометрических размеров посредством микроскопа.

5 От чего зависит точность измерения глубины дефекта посредством микроскопа?

6 Сформулируйте основные законы геометрической оптики.

7 Как связаны показатель преломления среды и скорость распространения света в ней?

8 Почему при рассмотрении предмета через плоскую стеклянную пластинку он кажется расположенным ближе?

4 Исследование тепловых методов получения информации

Цель работы: изучить теоретические основы и основные приборы для измерения температуры, овладеть практическими навыками работы пирометром.

4.1 Основные теоретические положения

Тепловыми называются измерения, принцип осуществления которых основан на использовании тепловых процессов (нагрев, охлаждение, теплообмен), а входной величиной является температура. К тепловым преобразователям относятся термопары и терморезисторы (металлические и полупроводниковые) [1–3].

Методы и средства измерения температуры принято делить на две большие группы – контактные и бесконтактные, которые, в свою очередь, подразделяются по физическим эффектам, положенным в основу принципа их действия.

К контактными методам относятся термометры расширения (ртутные, спиртовые и др.), а также биметаллические и dilatометрические термометры. К этому классу относят термопарные датчики, терморезистивные преобразователи, световодные датчики и многие термоиндикаторы.

Группу бесконтактных измерителей температуры составляют методы пирометрии и термометрии излучения.

Термометры расширения или жидкостные термометры. Жидкостные термометры могут быть как бытовыми, так и техническими. Жидкостный термометр работает по самой простой схеме – при изменении температуры, объем жидкости внутри термометра изменяется и при увеличении температуры – жидкость расширяется и ползет вверх, а при уменьшении – наоборот. Обычно в жидкостных термометрах применяется либо спирт, либо ртуть.

Термометры сопротивления (ТС) применяют в системах, где требуется дистанционная передача показаний. Принцип работы таких термометров основан на свойстве металлов изменять удельное сопротивление при изменении температуры.

Чувствительные элементы термометров сопротивления выполняют из медной (термометры сопротивления медные – ТСМ) или платиновой (ТСП) проволоки, намотанной на каркас.

Термопары применяют для измерения температур в пределах до 1800 °С. Действие термопары основано на следующем принципе. Если спаять два стержня из различных металлов, а затем спаянный (горячий) и свободные (холодные) концы поместить в среды с различными температурами, то между свободными концами стержней появляется разность потенциалов. Свободные концы стержней соединяют с приемником тока и получают электрическую цепь, в которой находится источник ЭДС.

Величина термоэлектродвижущей силы (ЭДС) в цепи зависит от разности температур, в которые помещены свободные и спаянный концы термопары, и от свойств металлов или сплавов, из которых изготовлены стержни.

Биметаллические термометры состоят из двух свальцованных друг с другом пластин из металлов с различными коэффициентами расширения (биметалл), искривляются при изменении температуры. Искривление находится в приблизительной пропорции с температурой.

Биметаллическая пластина легла в основу двух различных измерительных элементов:

- 1) винтовая пружина;
- 2) спиральная пружина.

В результате механической деформации биметаллических пластин при изменении температуры в указанных элементах возникает вращательное движение. Если внешний конец биметаллической измерительной системы жестко

закреплен, то другой конец без промежуточного элемента проворачивает вал указательной стрелки.

Манометрические термометры применяют для измерения температуры в зоне аппарата. Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости между температурой и давлением жидкости или газа при постоянном объеме. Измерительная система состоит из погружаемого элемента, капиллярного провода и трубчатой пружины в корпусе.

Данные элементы соединены в единое устройство, которое под давлением заполнено инертным газом. Изменение температуры влечёт изменение объема или внутреннего давления в погружаемом устройстве. Давление деформирует измерительную пружину, отклонение которой передается с помощью стрелочного механизма на стрелку. Диапазоны показаний лежат в пределах между минус 200 °С и плюс 700 °С.

Пирометрические методы измерений температуры охватывают широкий диапазон температур от 173 К до 6000 К, включающий в себя низкие, средние и высокие температуры. Эти методы основаны на определении параметров теплового излучения объекта без нарушения его температурного поля. Тепловое излучение представляет собой электромагнитное излучение, возбуждаемое тепловым движением атомов и молекул в твердых, жидких и газообразных веществах. При температурах выше 4000 К излучение вызывается процессами диссоциации и ионизации.

Теория пирометрических методов измерений температуры основана на законах, устанавливающих связь между излучением абсолютно черного тела (АЧТ) и его температурой. Абсолютно черным телом называется тело, поглощающее все падающее на него излучение и, соответственно, способное при данной температуре излучать максимальную энергию.

Закон Планка устанавливает связь между абсолютной температурой и спектральным распределением потока излучения (светимости) АЧТ:

$$M_{\lambda T}^O = C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)^{-1}, \quad (4.1)$$

где $M_{\lambda T}^O$ – спектральная плотность потока излучения АЧТ.

Соответственно первая и вторая постоянные излучения: $C_1 = 2\pi c^2 h = 3,741832 \cdot 10^{-16}$ Вт·м² и $C_2 = ch / r = 0,01438786$ м·К, где c – скорость света; h – постоянная Планка; r – постоянная Больцмана.

При малых значениях λT можно пользоваться законом Вина

$$M_{\lambda T}^O = C_1 \lambda^{-5} e^{C_2/(\lambda T)}. \quad (4.2)$$

Полная энергия, излучаемая с единицы поверхности АЧТ в единицу времени, определяется законом Стефана – Больцмана:

$$M_T^O = \sigma T^4, \quad (4.3)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана, $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Разработка чувствительных приемников инфракрасного (ИК) излучения позволяет применять, пирометрические методы для измерения не только высоких, но и низких температур. Приборы для измерения температур объектов по их тепловому электромагнитному излучению называются пирометрами.

В зависимости от естественной входной величины пирометры разделяются на *пирометры полного излучения (радиационные пирометры)*, воспринимающие полную (интегральную) энергию излучения, *пирометры частичного излучения (яркостные пирометры)*, основанные на зависимости от температуры энергетической яркости излучения в ограниченном диапазоне длин волн, и *пирометры спектрального отношения (цветовые пирометры)*, в которых используется зависимость от температуры отношения спектральных плотностей энергетических яркостей на двух или нескольких длинах волн.

Пирометры прямого преобразования обычно состоят из оптической системы, приемника излучения, измерительной цепи с вторичным прибором, а в ряде случаев с микропроцессорным вычислительным устройством. В пирометрах уравнивающего преобразования, кроме того, имеется образцовый источник излучения. В зависимости от вида оптической системы, с помощью которой излучение передается на приемник излучения, пирометры разделяются на рефракторные с собирающей линзой, рефлекторные с собирающим зеркалом, световодные и комбинированные.

Пирометры полного излучения, или радиационные пирометры. Эти пирометры основаны на зависимости от температуры интегральной мощности излучения АЧТ во всем диапазоне длин волн, определяемой законом Стефана – Больцмана.

Например, для стальных изделий в зависимости от появления на них окисной пленки значение ϵ может изменяться от 0,1 до 0,9. Пирометр, градуированный по излучению АЧТ, при измерении на реальном объекте покажет так называемую радиационную температуру T_p , значение которой всегда меньше действительной температуры объекта T . Радиационной температурой объекта называется такая температура АЧТ, при которой его полная мощность излучения равна полной мощности излучения рассматриваемого объекта при температуре T .

Пирометры полного излучения применяются для измерения в диапазоне температур от минус 50 °С до плюс 3500 °С. Наиболее целесообразно использовать такие пирометры для измерения температуры объектов, излучательные свойства которых мало отличаются от свойств АЧТ. Этому условию удовлетворяют большинство закрытых печей и топок с малым отверстием, кожа человека, стекло, резина и др.

Пирометры частичного излучения. Их действие основано на использовании зависимости от температуры мощности излучения в ограниченном диапазоне длин волн. Рабочий диапазон измерений таких пирометров от минус 100 °С до плюс 6000 °С.

Разновидностью пирометра частичного излучения является *монокроматический яркостный пирометр*, основанный на сравнении энергетической яркости объекта исследования с энергетической яркостью образцового

излучателя в узком участке спектра излучения. В качестве образцовых излучателей обычно используются лампы накаливания с плоской вольфрамовой нитью, которые при температуре нити ниже 1500 °С имеют стабильную зависимость яркости от тока накала нити.

Вследствие неполноты излучения реальных тел яркостные пирометры измеряют не действительную температуру тела T , а так называемую яркостную температуру T_y . Соотношение между действительной и яркостной температурами, как следует из законов излучения, определяется выражением

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_y} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon_\lambda, \quad (4.4)$$

где ε_λ – коэффициент теплового излучения для длины волны λ .

Большинство яркостных пирометров, работающих в видимой области спектра, снабжаются красным светофильтром, обеспечивающим эффективную длину волны, равную $(0,656 \pm 0,008)$ мкм.

Пирометры спектрального отношения, или цветные пирометры. Они показывают так называемую цветовую температуру тела T_c – условную температуру, при которой АЧТ имеет такое же относительное спектральное распределение энергетической яркости, что и исследуемое реальное тело с действительной температурой T .

Показания пирометра спектрального отношения соответствуют действительной температуре, если объект является абсолютно черным или серым телом, т. е. таким телом, у которого излучательная способность для всех длин волн одинакова.

Погрешности пирометров спектрального отношения меньше, чем у пирометров полного или частичного излучения. Их показания принципиально не зависят от расстояния до объекта исследования, а также от поглощения излучения в промежуточной среде между объектом и пирометром.

В большинстве серийно выпускаемых пирометров модуляция излучения осуществляется при помощи механических модуляторов, приводимых в движение синхронными микродвигателями. В качестве приемников излучения применяются термобатарей (в пирометрах полного излучения), фотодиоды, фоторезисторы или пироэлектрические приемники. В некоторых приборах приемники излучения термостатированы.

Тепловидение и термографы. Пирометрические методы находят все более широкое применение для получения видимого изображения и регистрации температурного поля поверхности различных объектов. Приборы для наблюдения и исследования объектов по их тепловому излучению называются тепловизорами, термографами или тепловизорными микроскопами.

Первые приборы, разработанные для ночного видения, основанные на применении электронно-оптических методов усиления и визуализации фотоэлектронов, имели спектральный диапазон чувствительности до 1,3 мкм и позволяли наблюдать распределение температур только выше 400 °С.

Телевизионные приемные трубки-видиконы с фоторезистивным слоем из пленки оксида свинца или сульфида оксида свинца чувствительны к излучению до 2 мкм. Чувствительные телекамеры, снабженные такими видиконами, дают возможность определить температурное поле при температурах выше 250 °С.

Создание чувствительных приемников инфракрасного излучения, спектральная чувствительность которых простирается далеко в инфракрасную область спектра, открыло широкие возможности для развития термографии и тепловидения объектов с более низкими температурами.

Телевизионные приемники инфракрасного излучения, в которых видикон выполнен со сканируемой поверхностью из пироэлектрического кристалла триглицилсульфата, позволяют создавать чувствительные пироэлектрические тепловизоры, известные под названием пиротронов, пироконов или видиконов пироэлектрических, которые обеспечивают прием инфракрасного излучения вплоть до 40 мкм.

В серийно выпускаемых тепловизорах и термографах пока в основном применяются дискретные приемники инфракрасного излучения и оптико-механические, системы развертки изображения при помощи вращающихся или колеблющихся зеркал или призм.

В качестве приемников излучения сейчас преимущественно применяются фоторезисторы из антимонида индия, охлаждаемые жидким азотом до минус 196 °С. Такие приемники имеют постоянную времени 1 мкс, что позволяет в зависимости от требуемого геометрического разрешения получать кадры с частотой 0,5...60 Гц. Низкая частота кадров пока ограничивает применение тепловизоров при исследовании динамики тепловых процессов и наблюдении быстро движущихся объектов. Можно увеличить геометрическое разрешение и частоту кадров применением нескольких приемников, соединенных в строку или детекторную матрицу.

Для исследования температурных полей малых объектов разработаны тепловизорные микроскопы и микрорадиометры, применяемые, например, для исследования температурного поля микросхем с целью обнаружения скрытых дефектов. В таких приборах используется микроскопная оптика с увеличением от 3 до 125.

4.2 Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы используются: пирометры, образцы для измерения температуры

4.3 Порядок выполнения работы

4.3.1 Изучить основные виды приборов для измерения температуры и их теоретические основы.

4.3.2 Изучить основные теоретические положения бесконтактных методов измерения температуры.

4.3.3 Изучить по техническим паспортам устройство и принцип действия пирометров.

4.3.4 Провести измерения температуры пирометрами.

4.4 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, перечень используемого оборудования, результаты измерений, выводы.

Контрольные вопросы

1 Что лежит в основе теории бесконтактного метода измерения температуры?

2 На какие виды, в зависимости от естественной входной величины, разделяются пирометры?

3 Из каких основных блоков состоит пирометр?

4 Какие устройства, кроме пирометров, можно использовать для бесконтактного измерения температуры?

5 Какие виды термометров применяются для измерения температуры?

6 Поясните принцип действия жидкостного термометра. Какие жидкости могут использоваться в данных термометрах?

7 На чем основаны измерения с помощью термопар?

8 Назовите принцип действия термометра сопротивления. Какие материалы могут использоваться для их изготовления?

9 Назовите принципы действия биметаллического и манометрического термометров.

10 Поясните принцип действия тепловизора.

5 Исследование магнитных методов получения информации

Цель работы: изучить принцип действия преобразователя Холла, приобрести навыки работы с приборами для измерения напряженности магнитного поля.

5.1 Основные теоретические положения

Магнитные методы получения информации основаны на физических эффектах, результатом которых является преобразование в электрический сигнал характеристик магнитных полей или магнитных характеристик материалов и изделий. Обычно при данном виде измерительных преобразований объект измерения или его часть помещается в постоянное или переменное магнитное поле, создаваемое за счет протекания электрического тока по проводнику, обмотке или непосредственно по объекту, а также постоянными магнитами [1, 3, 4].

Основными величинами, характеризующими магнитное поле, являются магнитный поток, магнитная индукция и напряженность магнитного поля. Измеряемые магнитные величины обычно предварительно преобразуются в электрические величины, более удобные для измерения. Преобразователи строятся на основе явлений электромагнитной индукции, ядерного магнитного резонанса, гальваномагнитного и некоторых других явлений [1].

Действие индукционных измерительных преобразователей основано на явлении электромагнитной индукции, суть которого заключается в возникновении в замкнутом проводящем контуре, пронизываемом изменяющимся во времени магнитным потоком Φ , ЭДС индукции e :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (5.1)$$

Электрический ток, вызываемый этой ЭДС, называется индукционным.

Согласно (5.1) ЭДС индукции прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока. Знак минус в правой части выражения определяет направление индукционного тока в соответствии с правилом Ленца, согласно которому индукционный ток в контуре направлен так, что создаваемый им магнитный поток стремится препятствовать тому изменению магнитного потока, которое вызывает данный ток (следствие закона сохранения энергии).

Действие *магнитомодуляционных преобразователей* основано на проявлении нелинейных свойств ферромагнетиков при их намагничивании одновременно в полях разных частот [1].

В отличие от пассивных индукционных преобразователей магнитомодуляционные (феррозондовые преобразователи) являются устройствами активного типа. Происходящие в них процессы всегда связаны со взаимодействием минимум двух магнитных полей – внешнего измеряемого и вспомогательного поля возбуждения, создаваемого за счет протекания электрического тока в одной из обмоток. Благодаря этому появляется возможность преобразования в электрический сигнал на основе явления электромагнитной индукции характеристик постоянных магнитных полей без использования механического вращения индукционной измерительной обмотки.

Действие гальваномагнитных преобразователей основано на использовании гальваномагнитных явлений, связанных с действием магнитного поля на электрические (гальванические) свойства проводников и полупроводников, по которым протекает электрический ток. Наибольшее значение имеют поперечные гальваномагнитные явления, когда силовые линии магнитного поля перпендикулярны направлению электрического тока. К ним относятся эффект Холла и магниторезистивный эффект – эффект Гаусса.

Преобразователь Холла. В 1880 г. Холлом было обнаружено явление, названное впоследствии *гальваномагнитным эффектом Холла*. Принцип действия рассматриваемого преобразователя основан на эффекте Холла, который заключается в следующем. Если пластинку из металла или полупроводника поместить в магнитное поле напряженностью H и по ней пропустить ток I , то

на противоположных гранях пластины появится ЭДС. (рисунок 5.1) [1, 3].

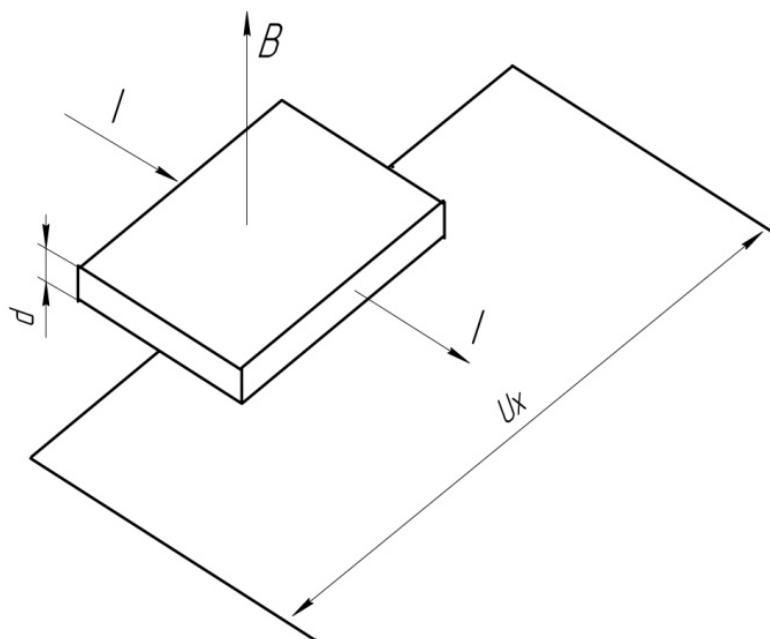


Рисунок 5.1 – Преобразователь Холла

Эффект Холла объясняется действием силы на электрический заряд, движущийся в магнитном поле, и может проявляться как в металлах, так и в полупроводниках, причем в последних он проявляется значительно сильнее. Поэтому в качестве материалов для преобразователей Холла используют исключительно полупроводники (кремний, германий и др.). ЭДС Холла определяется по формуле (без учета знака)

$$U_x = R_x \frac{IB}{d}, \quad (5.2)$$

где R_x – постоянная Холла.

Основными достоинствами датчиков Холла являются пропорциональность ЭДС Холла напряженности магнитного поля, малый размер чувствительного элемента преобразователя, возможность измерения как постоянного, так и переменных магнитных полей в широком диапазоне от 10 до 10^7 А/м.

Обычно, если измеряют переменные магнитные поля, то преобразователь запитывают постоянным током и наоборот. Размер чувствительного элемента преобразователя может достигать $0,01 \times 0,01$ мм и меньше.

Достоинством приборов на основе как постоянных, так и переменных магнитных полей, является хорошее пространственное разрешение благодаря малым размерам преобразователей.

Недостаток – большая зависимость ЭДС Холла от температуры. Основная погрешность составляет десятые доли процента. Диапазон измерений от сотых долей до единиц тесла.

Магниторезистивный эффект заключается в изменении электрического

сопротивления твердых проводников под действием внешнего магнитного поля. Это изменение обусловлено увеличением удельного электрического сопротивления проводящего материала под действием магнитного поля [1].

Причина магниторезистивного эффекта, как и в случае эффекта Холла, заключается в искривлении траекторий носителей заряда под действием магнитного поля. Количественно эффект зависит от материала гальваномагнитного элемента и его формы.

5.2 Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы используются: электромагнит, соленоид, система проводников, прибор для измерения характеристик магнитного поля с датчиком Холла.

5.3 Порядок выполнения работы

5.3.1 Изучить инструкцию по эксплуатации прибора для измерения характеристик магнитного поля.

5.3.2 Провести измерения характеристик магнитного поля на поверхности образца, содержащего искусственный дефект.

5.3.3 Изобразить топографию магнитного поля в окрестностях исследуемого объекта.

5.4 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, перечень используемого оборудования, результаты измерений, топографию индукции магнитного поля на поверхности образца.

Контрольные вопросы

- 1 На каком принципе основана работа преобразователей Холла?
- 2 Какие существуют преобразователи для измерения характеристик магнитного поля?
- 3 На каком принципе основана работа индукционных преобразователей?
- 4 Какие преобразователи относят к активным?
- 5 Поясните принцип действия магниторезистивных первичных преобразователей.

6 Исследование электрических методов получения информации

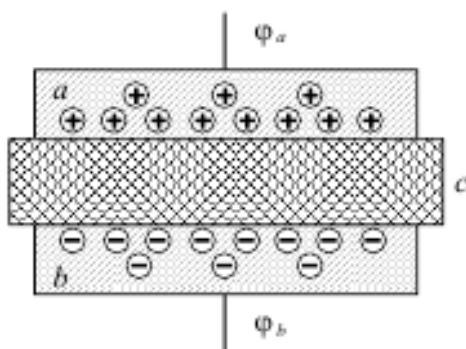
Цель работы: ознакомиться с основами электрических методов измерений, построить картину эквипотенциальных линий в электролитической ванне.

6.1 Основные теоретические сведения

Электрические методы получения информации основаны на физических эффектах, результатом которых является преобразование в электрический сигнал характеристик электрических полей или электрических характеристик материалов и изделий. Обычно при данном виде получения информации объект измерения или его часть помещается в постоянное или переменное электрическое поле, создаваемое между электродами, контактирующими с электропроводящим объектом измерения (электродные и электрохимические измерительные преобразователи), либо между обкладками электрического конденсатора (емкостные измерительные преобразователи) [1–5].

Емкостный метод получения информации основан на зависимости комплексного электрического сопротивления конденсатора от различных факторов.

Конденсатор образуется двумя сближенными проводниками, разделенными диэлектриком (рисунок 6.1).



a, b – проводники; c – диэлектрик

Рисунок 6.1 – Электрический конденсатор

Проводники заряжаются равными и противоположными по знаку зарядами q . Вследствие взаимного притяжения разноименных зарядов поверхностная плотность зарядов будет выше на обращенных друг к другу частях поверхностей проводников, чем на других частях. Между проводниками должна существовать разность потенциалов $U = \varphi_a - \varphi_b$. Оценка конденсаторов производится по величине электрической емкости C , представляющей собой отношение величины заряда q к разности потенциалов U :

$$C = \frac{q}{U}. \quad (6.1)$$

При использовании емкостных первичных преобразователей в качестве информативного параметра выходного электрического сигнала конденсатора может использоваться не только значение емкости, но и значение активного сопротивления конденсатора.

Электропотенциальные методы получения информации основаны на зависимости распределения электрического потенциала на поверхности объекта, по которому протекает электрический ток, от свойств этого объекта.

Действие пьезоэлектрических измерительных преобразователей основано на использовании прямого и обратного пьезоэлектрических эффектов (пьезоэффектов). Эти эффекты наблюдаются в ряде диэлектриков: природных кристаллах, таких как кварц (химическая формула SiO_2), поляризованных керамических материалах и некоторых полимерах, например поливинилиденфториде. Материалы, обладающие пьезоэлектрическими свойствами, называются пьезоэлектриками. Сущность прямого пьезоэффекта заключается в электрической поляризации пьезоэлектриков, проявляющейся появлением электрических зарядов на их поверхности, под действием механической деформации. Слово «пьезо» происходит от греческого *piezen*, означающего давление. Пьезоэффект является обратимым физическим явлением. Обратный пьезоэффект заключается в возникновении в пьезоэлектриках механического напряжения или деформации под действием электрической поляризации.

Родственным пьезоэлектрическому по физической природе является пирозлектрический эффект, сущность которого заключается в поляризации диэлектрика вследствие нагрева. Подобно описанным выше пьезоэлектрикам пирозлектрики можно рассматривать как совокупность упорядоченно расположенных электрических диполей. Нагрев пирозлектрика приводит в результате теплового расширения к его деформации и проявлению пьезоэффекта. Кроме того, появлению поляризационных зарядов способствует тепловая деформация (удлинение) и нарушение первоначальной ориентации отдельных диполей.

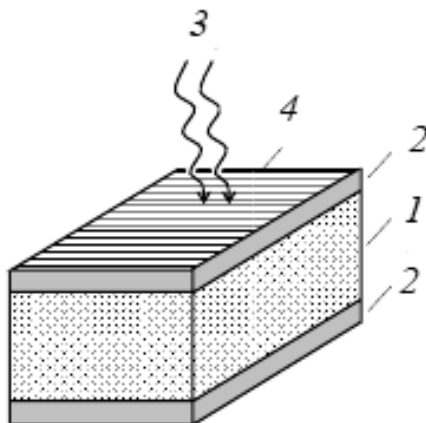
На рисунке 6.2 схематично показана структура пирозлектрического преобразователя, представляющего собой прямоугольный параллелепипед 1 из пирозлектрического материала, противоположные грани которого имеют электроды 2 для сбора индуцированных теплом электрических зарядов. Электрод, который подвергается воздействию теплового потока 3, покрыт теплопоглощающим слоем 4.

Возникающая в результате проявления пирозэффекта разность потенциалов U связана с изменением температуры кристалла ΔT выражением

$$U = \frac{p_n h}{\varepsilon} \Delta T, \quad (6.2)$$

где p_n – пирозлектрический коэффициент;
 h – толщина кристалла;

ε – диэлектрическая проницаемость материала.



1 – пьезоэлектрический материал; 2 – электроды; 3 – тепловой поток; 4 – теплопоглощающий слой

Рисунок 6.2 – Пьезоэлектрический преобразователь

Действие преобразователей на использовании тензоэффекта, заключающегося в изменении активного электрического сопротивления проводников или полупроводников при их механической деформации. Характеристикой тензоэффекта материала является коэффициент относительной тензочувствительности k , определяемый как отношение относительного изменения сопротивления R к относительному изменению длины проводника l :

$$k = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}. \quad (6.3)$$

Измерение характеристик электрического поля. Взаимодействие неподвижных электрических зарядов происходит через электрическое поле, образующееся вокруг этих зарядов. На каждый заряд действует электрическое поле, созданное остальными зарядами. Поле, созданное зарядами, неподвижными в данной системе отсчета, называют *электростатическим* [2].

Электрическое поле есть физическая реальность; возмущения в поле передаются с конечной скоростью, равной скорости распространения света.

Основными количественными характеристиками электростатического поля являются вектор напряженности \vec{E} и скалярный потенциал.

Векторные характеристики электростатического поля изучают, помещая в него положительный точечный пробный заряд, и наблюдают действующую на него со стороны поля силу. Отношение силы \vec{F} , влияющей на этот пробный заряд, к его величине $q_{пр}$ зависит от величины заряда и характеризует данную точку поля. Это отношение определяет физическую величину, называемую вектором *напряженности электростатического поля*:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{np}}. \quad (6.4)$$

Чтобы не вносить изменения в исследуемое поле, пробный заряд берется достаточно малым. Если положить, что $q_{np} = +1$ Кл, то \vec{E} по величине и направлению совпадает с силой \vec{F} .

Таким образом, *напряжённость электростатического поля в некоторой точке является векторной физической величиной, равной вектору силы, действующей на единицу положительного заряда, помещённого в эту точку.*

Например, поле точечного заряда описывается выражением

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}, \quad (6.5)$$

где q – величина заряда, создающего поле;

\vec{r} – радиус-вектор, проведенный от заряда q к точке поля;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

ϵ_0 – электрическая постоянная.

Силовой линией или линией напряженности электростатического поля называется линия, в каждой точке которой вектор напряженности направлен по касательной. Например, линиями напряженности поля положительного точечного заряда являются радиальные линии, исходящие из этого заряда. Такое поле называют центральным.

Силы поля, перемещая точечный заряд, совершают работу, которая зависит от начального и конечного положений заряда в пространстве и не зависит от выбора траектории движения. Работа по замкнутой траектории в этом случае будет равна нулю. Такое поле называется *потенциальным*. Каждой точке пространства можно сопоставить значение потенциальной энергии W перемещаемого заряда. Работа поля по перемещению заряда из одной точки поля в другую будет равна разности потенциальных энергий:

$$A_{12} = W_1 - W_2. \quad (6.6)$$

Отношение потенциальной энергии W положительного точечного пробного заряда к величине этого заряда q_{np} , называется *потенциалом поля* φ . Тогда разность потенциалов двух точек поля равна отношению работы сил поля по перемещению положительного точечного заряда из одной точки поля в другую к величине этого заряда.

Учитывая, что в общем случае $A_{12} = \int_1^2 \vec{F} d\vec{l} = \int_1^2 q_{np} \vec{E} \cdot d\vec{l}$, получим

$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l}$, где интегрирование можно производить вдоль любой линии l ,

соединяющей начальную и конечную точки поля 1 и 2.

Потенциал электростатического поля данной точки численно равен работе, которую совершат силы поля при перемещении положительного единичного заряда из данной точки в бесконечно удаленную, потенциал которой считается равным нулю:

$$\varphi = \int_r^{\infty} E \cdot dr = \int_r^{\infty} \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot dr = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (6.7)$$

Геометрическое место точек поля, имеющих один и тот же потенциал, называют *эквипотенциальной поверхностью*. Например, эквипотенциальными поверхностями поля точечного заряда являются концентрические сферы.

Силовые линии электростатического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям. Действительно, если мысленно перемещать пробный заряд по эквипотенциальной поверхности (рисунок 6.3), то работа $dA = -q d\varphi = 0$ ($\varphi = \text{const}$, $d\varphi = 0$).

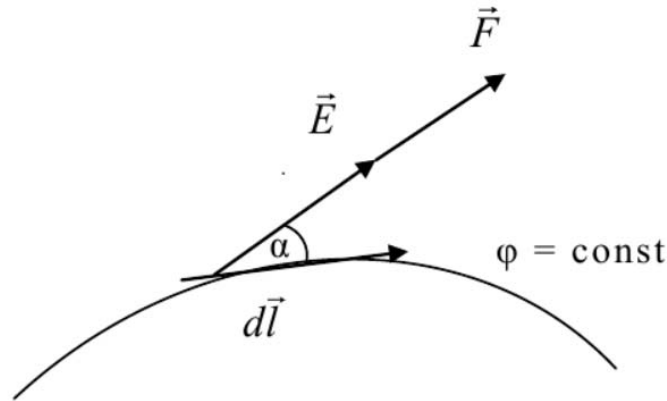


Рисунок 6.3 – Перемещение заряда по эквипотенциальной поверхности

Это возможно, если сила перпендикулярна перемещению.

Изменение потенциала на единицу длины по направлению вектора \vec{l} (рисунок 6.4) характеризуется производной по этому направлению:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial l} = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}. \quad (6.8)$$

Расстояние между двумя точками этих поверхностей по направлению вектора \vec{l} равно Δl , по направлению нормали \vec{n} к поверхности – Δn . Тогда

$$\Delta l = \frac{\Delta n}{\cos \alpha}.$$

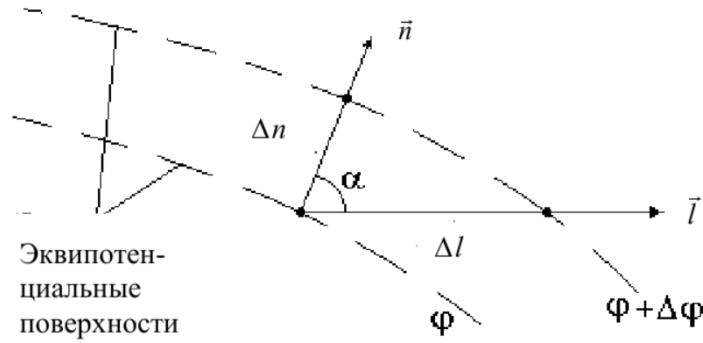


Рисунок 6.4 – Определение производной

В этом случае формула (6.8) запишется в виде

$$\frac{\partial \varphi}{\partial l} = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta l} = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta n} \cdot \cos \alpha = \frac{\partial \varphi}{\partial n} \cdot \cos \alpha. \quad (6.9)$$

Согласно соотношению (6.9) изменение потенциала на единицу длины будет максимальным при $\alpha = 0$, т. е. по нормали \vec{n} .

Вектор, направленный в сторону увеличения потенциала и равный производной потенциала по направлению нормали к эквипотенциальной поверхности, называется *градиентом потенциала* и обозначается

$$\text{grad} \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial n} \cdot \vec{n}, \quad (6.10)$$

где \vec{n} – единичный вектор нормали.

Работа по переносу пробного заряда из точки 1 в точку 2 вдоль нормали \vec{n} :

$$dA = F_n dn = qE_n dn, \quad (6.11)$$

но, с другой стороны,

$$dA = -q d\varphi. \quad (6.12)$$

Приравнивая правые части записанных выражений, получим связь между напряженностью и потенциалом:

$$E_n = -\frac{d\varphi}{dn}. \quad (6.13)$$

Из этого соотношения видно, что вектор \vec{E} направлен по нормали к эквипотенциальной поверхности в сторону убывания потенциала, т. е. векторы напряженности поля и градиенты потенциала равны по модулю, но противоположны по направлению:

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi. \quad (6.14)$$

Вектор напряженности электрического поля противоположен градиенту потенциала, т. е. направлен по нормали к эквипотенциальной поверхности в сторону уменьшения потенциала.

Градиент и напряженность измеряются в одних и тех же единицах: вольт на метр.

Графически электрические поля изображают при помощи силовых линий и эквипотенциальных поверхностей. Силовые линии рекомендуется проводить сплошными линиями, эквипотенциальные поверхности – пунктирными. Силовые линии и эквипотенциальные поверхности взаимно перпендикулярны, причем эквипотенциальные поверхности проводят так, чтобы значения потенциалов соседних поверхностей отличались бы на одно и то же значение, допустим, на 1 В, а число силовых линий на единицу площади, перпендикулярной направлению поля, было бы пропорционально модулю напряженности этого поля.

Например, изображение поля точечного заряда представлено на рисунке 6.5.

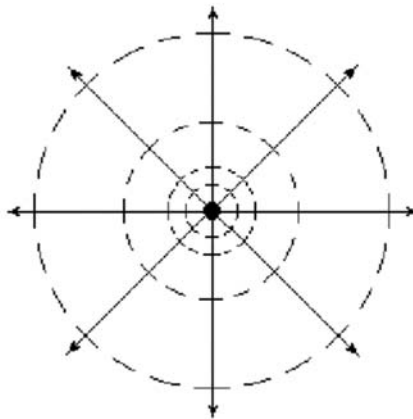


Рисунок 6.5 – Графическое изображение поля точечного заряда

По картине поля можно рассчитать усредненную напряженность поля в некоторой области

$$\langle E \rangle = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta n},$$

где $\langle E \rangle$ – усредненная напряженность поля;

$\Delta\varphi$ – разность потенциалов между соседними эквипотенциальными поверхностями;

Δn – расстояние между этими поверхностями по нормали.

6.2 Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы используются: электролитическая ванна, источник переменного напряжения 15 В, вольтметр переменного тока АВО-63, набор образцов электродов и электрический зонд.

6.3 Порядок выполнения работы

6.3.1 Ознакомиться с краткими теоретическими сведениями о первичных преобразователях, электрических полях, методах их моделирования.

6.3.2 Собрать экспериментальную установку. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 6.6.

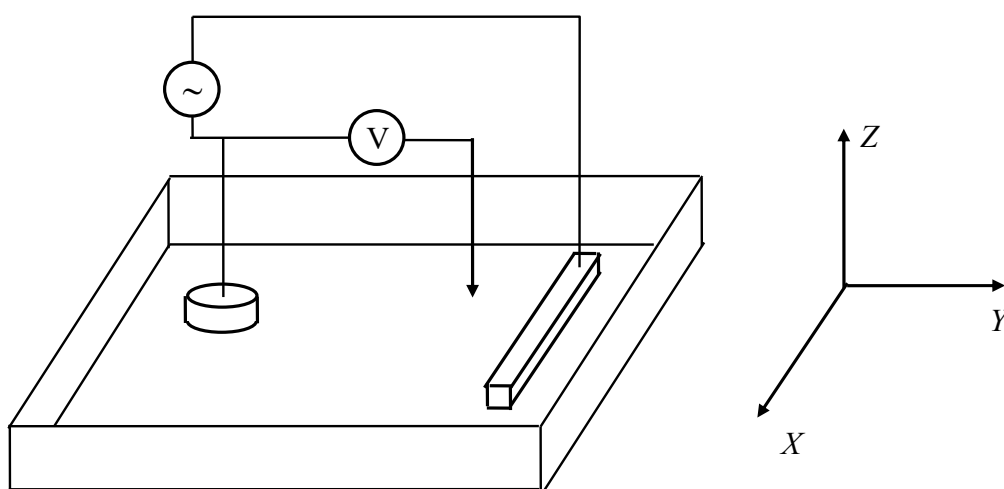


Рисунок 6.6 – Схема экспериментальной установки

Источник напряжения подключен к электродам системы, расположенным в ванне, наполненной водопроводной водой. Между подвижным электрическим зондом и одним из выводов источника питания включен вольтметр для измерения потенциалов поля системы.

6.3.3 По заданию преподавателя исследовать электрические поля в электролитической ванне.

6.3.4 По результатам измерений построить картину силовых линий исследуемого поля.

6.4 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель лабораторной работы, приборы и материалы, схемы, по которым проводятся эксперименты, картина поля в масштабе, полученная в результате проведения эксперимента, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 На чем основаны электрические методы получения информации?
- 2 Какие преобразователи используются при проведении измерений?
- 3 На чем основано действие емкостных первичных преобразователей?
- 4 Что кроме емкости может использоваться в качестве информативного параметра у емкостных преобразователей?
- 5 Поясните основы электропотенциальных методов получения информации.
- 6 На чем основано действие пьезоэлектрических измерительных преобразователей?
- 7 Какое поле называется электростатическим? Что называют напряженностью электростатического поля, в каких единицах она измеряется?
- 8 Выведите формулу напряженности поля точечного заряда.
- 9 Какое поле называется потенциальным, однородным, центральным?
- 10 Запишите условие потенциальности электростатического поля.
- 11 Что называется потенциалом? Выведите формулу потенциала точечного заряда.
- 12 Что называют градиентом потенциала и как он связан с напряженностью электрического поля?

Список литературы

- 1 **Гольдштейн, А. Е.** Физические основы получения информации: учебник для прикладного бакалавриата / А. Е. Гольдштейн. – Москва: Юрайт, 2018. – 219 с.
- 2 **Шишмарев, В. Ю.** Физические основы получения информации: учебное пособие / В. Ю. Шишмарев. – Москва: Академия, 2010. – 448 с.
- 3 Информационно-измерительная техника и электроника. Преобразователи неэлектрических величин : учебное пособие для среднего профессионального образования / О. А. Агеев [и др.] ; под общ. ред. О. А. Агеева, В. В. Петрова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2021. – 158 с.
- 4 **Раннев, Г. Г.** Физические основы получения информации: учебник / Г. Г. Раннев, В. А. Суругина, А. П. Тарасенко. – Москва: Курс; ИНФРА-М, 2016. – 296 с.
- 5 **Левшина, Е. С.** Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи: учебное пособие / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1983. – 319 с.