

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Прикладная физика

Направление подготовки: 35.03.06 Агроинженерия

Профиль образовательной программы: Технические системы в агробизнесе

Форма обучения: очная

СОДЕРЖАНИЕ

1. Методические указания по выполнению лабораторных работ.....	3
1.1 Лабораторная работа № ЛР-1 Аналоговые электроизмерительные приборы.....	3
1.2 Лабораторная работа № ЛР-2 Цифровые мультиметры.....	13
1.3 Лабораторная работа № ЛР-3 Градуировка термопары.....	16
1.4 Лабораторная работа № ЛР-4 Измерение индукции магнитного поля.....	21
1.5 Лабораторная работа № ЛР-5 Измерение радиоактивного излучения.....	23
1.6 Лабораторная работа № ЛР-6 Структура кристаллов и рентгеновская дифракция.....	31
1.7 Лабораторная работа № ЛР-7 Рентгеновский дифрактометр.....	38
1.8 Лабораторная работа № ЛР-8 Идентификация вещества по данным о межплоскостных расстояниях.....	45
1.9 Лабораторная работа № ЛР-9 Изучение электронного осциллографа	48
1.10 Лабораторная работа № ЛР-10 Изучение электронного осциллографа	57
1.11 Лабораторная работа № ЛР-11 Снятие температурной характеристики терморезистора.....	60
1.12 Лабораторная работа №ЛР- 12 Изучение характеристик фоторезистора.....	62
1.13 Лабораторная работа № ЛР-13 Измерение вольт-амперной характеристики полупроводникового диода.....	69
1.14 Лабораторная работа № ЛР-14 Полупроводниковые выпрямители переменного тока	72
1.15 Лабораторная работа № ЛР-15 Изучение фотодиода.....	76
1.16 Лабораторная работа № ЛР-16 Изучение светоизлучающих диодов.....	83
1.17 Лабораторная работа № ЛР-17 Фотоэлектрический метод преобразования солнечного света.....	90
1.18 Лабораторная работа № ЛР-18 Измерение нагрузочной вольт-амперной характеристики солнечной батареи.....	96
1.19 Лабораторная работа № ЛР- 19 : Влияние на к.п.д солнечной батареи температуры и уровня освещенности.....	102
1.20 Лабораторная работа № ЛР-20 Спектральная чувствительность солнечного фотопреобразователя	108
1.21 Лабораторная работа № ЛР-21 Современные солнечные батареи.....	111
1.22 Лабораторная работа № ЛР-22 Солнечные фотоэлектрические системы (электростанции).....	118
1.23 Лабораторная работа № ЛР-23 Автономные солнечные ФЭС (устройство, компоненты, работа).....	129
1.24 Лабораторная работа № ЛР-24 Расчёт автономной ФЭС	137

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1.1 Лабораторная работа № ЛР-1 (2 часа)

Тема: «Аналоговые электроизмерительные приборы»

1.1.1 Цель работы: ознакомиться с принципами работы, устройством и характеристиками электроизмерительных приборов.

1.1.2 Задачи работы:

1. Изучить элементарные сведения по технике безопасности
2. Ознакомиться с устройством и принципом действия электроизмерительных приборов
3. Описать назначение, устройство и основные характеристики двух электроизмерительных приборов, используя условные обозначения на шкалах.

1.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Вольтметр (милливольтметр)
2. Амперметр (миллиамперметр)
3. Реостат
4. Соединительные провода

1.1.4 Описание (ход) работы:

I. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Анализ травматизма при эксплуатации электрических установок показывает, что большинство несчастных случаев происходит вследствие нарушения правил по технике безопасности. Правила по технике безопасности (ПТБ) при эксплуатации электроустановок делятся на ПТБ до 1000 В и выше. В наших лабораториях подводится напряжение до 1000 В.

Установлено, что результат поражения электрическим током зависит от величины тока, его частоты, времени воздействия, индивидуальных свойств организма, а также от пути тока. Сила тока через тело человека при прочих равных условиях в значительной степени определяется величиной электрического сопротивления тела.

Величина сопротивления человеческого тела зависит от состояния наружного кожного покрова, от степени увлажнения кожи, от физиологического состояния организма и т.д. Эта величина может меняться в широких пределах от 1000 Ом до 100 кОм, а иногда, в особенно неблагоприятных условиях, оно снижается до 400-500 Ом. Расчетным принято считать сопротивление 1000 Ом.

Действие электрического тока на человеке может быть: тепловым (ожог), механическим (разрыв тканей, резкие сокращения мышц), химическим (электролиз тканевых и межтканевых жидкостей, крови).

(См. приложение 5). Кроме того, проходя через человеческий организм, он может нарушать физиологические процессы и т.д.

Наиболее опасны постоянные токи и токи переменной частоты от 40 до 60 Гц величиной 0,1 А и выше. Во избежании поражения электрическим током следует соблюдать следующие правила по технике безопасности:

1. Все электрические схемы монтировать с помощью соединительных проводов. Провода должны быть изолированными.
2. Переплетение даже изолированных проводов не допускать.
3. Цепь вести от источника тока, но подключать источник тока в последнюю очередь. При разборке схемы прежде всего отключить источник тока.
4. Все реостаты, включенные в цепь, должны быть установлены на максимум сопротивления.
5. Потенциометры устанавливать на нуль подаваемого в контур напряжения.
6. Замыкать цепь без проверки схемы преподавателем или лаборантом категорически запрещается.
7. Ток замыкать только на время отсчетов.
8. Не производить переключение схем, находящихся под напряжением.
9. Не прикасаться к изолированным частям схемы.
10. Не оставлять без наблюдения схему, находящуюся под напряжением.
11. После выполнения лабораторной работы отключить схему от напряжения, если есть конденсаторы, то их разрядить.

II. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ НАИБОЛЕЕ ШИРОКО РАСПРОСТРАНЁННЫЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Все электроизмерительные приборы классифицируются по следующим основным признакам:

1. Показывающие приборы. Благодаря наличию в этих приборах шкалы (предварительно градуированной с эталоном) и указателя они дают возможность непосредственно отсчитать значение измеряемой величины.

2. Регистрирующие и самопищащие приборы. Такие приборы позволяют непрерывно или через определенные интервалы последовательно записывать значения измеряемой величины. Запись производится на миллиметровую бумагу, фотопленку.

3. Интегрирующие приборы. Они позволяют получать суммарное значение измеряемой величины (например, счетчики электрической энергии).

4. Интегрирующие приборы служат для сравнения измеряемой величины с образцом (мосты и потенциометры).

В свою очередь, показывающие приборы можно разделять :

а) по роду измеряемой величины: амперметры, вольтметры, омметры, счетчики, частотометры, фазометры и т.д.

б) по принципу действия: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, индукционные, тепловые, электростатические, электронные, вибрационные и т.д. (См. приложение 2).

в) по степени точности: 0,1 , 0,2, 0,5, 1,0, 1,5, 2,5, 4,0 классов. Приборы класса точности 0,1, 0,2, 0,5 применяются для точных измерений и называются прецизионными (класс точности прибора – относительная приведенная погрешность в процентах).

Электроизмерительные приборы состоят из подвижной и неподвижной частей. При измерениях вращающий момент подвижной части уравновешивается противодействующим моментом пружины какого-либо другого устройства. При равновесии указатель прибора фиксирует определенный угол поворота. Величина, численно равная отношению угла поворота подвижной части прибора к приращению измеряемой величины, называется чувствительностью прибора.

Если, например, приращение угла $\Delta\phi$ вызвано приращением тока ΔI , то чувствительность: $S = \Delta\phi / \DeltaI$. Величина, обратная чувствительности: $C = 1/S$ называется ценой деления прибора. С определяет значение электрической величины, вызывающей отклонение подвижной части прибора на одно деление.

Например, имеем вольтметр, который может измерять напряжение от 0 до 250 в. Шкала этого прибора разделена на 50 мелких делений. Чувствительность прибора:

$$S = \frac{\Delta\phi}{\DeltaU} = \frac{50 \text{дел.}}{250 \text{В}} = 0,2 \text{дел. / В}$$

Цена деления прибора:

$$C = \frac{250 \text{В}}{50 \text{дел.}} = 5 \text{ В / дел.}$$

Итак : для нахождения цены деления прибора нужно верхний предел (максимальное значение) измеряемой величины разделить на число делений шкалы прибора (если прибор многопредельный, цена деления для каждого предела будет своя).

Приборы магнитоэлектрической системы.

Неподвижная часть прибора такой системы представляет собой постоянный магнит (1) (рис.1), между полюсами которого создается сильное, равномерное, радиально направленное магнитное поле.

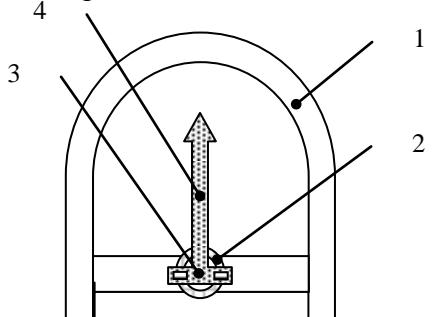


Рис.1

Подвижная часть прибора состоит (2) из прямоугольной рамки, на которой расположена обмотка из медной изолированной проволоки. Рамка прикреплена к корпусу спиральными пружинами (3), создающими противодействующий момент.

В результате взаимодействия магнитного поля магнита и рамки с током возникает вращающий момент, под действием которого подвижная часть прибора, а также с ним стрелка (4), поворачивается около оси. Угол поворота подвижной части прибора пропорционален величине тока, идущего в катушке: $\alpha = kI$, k – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции прибора. Достоинствами приборов магнитоэлектрической системы являются: высокая точность, высокая чувствительность, равномерность (линейность) шкалы, малая зависимость показаний прибора от воздействия внешних магнитных полей, быстрое самоуспокоение подвижной части прибора. Приборы магнитоэлектрической системы применяются в качестве амперметров и вольтметров постоянного тока. Миллиамперметры магнитоэлектрической системы могут измерять токи до 10^{-6} А.

К недостаткам приборов магнитоэлектрической системы можно отнести: измерение только постоянных токов, недостаточная перегрузочная способность их.

Приборы электромагнитной системы.

Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля тока, протекающего по обмотке неподвижной катушки (рис.2), с подвижным железным сердечником 2, помещенным в это магнитное поле. При увеличении тока возрастает индукция магнитного поля в катушке и увеличивается намагничивание железного сердечника. Теоретически установлено, что между углом поворота железного сердечника, при его втягивании внутрь катушки, и величиной тока в катушке существует квадратичная зависимость: $\alpha = kI^2$ (вследствие этого шкала приборов электромагнитной системы неравномерная, квадратичная). Приборы электромагнитной системы применяются для измерения величины тока и напряжения в цепях переменного и постоянного тока. Приборы

электромагнитной системы менее точны, однако они измеряют и постоянные, и переменные токи, просты и надежны в эксплуатации.

Приборы электродинамической системы.

Принцип действия прибора электродинамической системы основан на магнитном взаимодействии потоков, проходящих по обмоткам двух катушек - подвижной 1 и неподвижной 2 (рис.3). Обмотки катушек

соединены между собой в зависимости от назначения прибора, параллельно или последовательно. В вольтметрах они соединены последовательно, в амперметрах – параллельно.



Рис. 2



Рис. 3

Приборы электродинамической системы применяются для измерения в цепях переменного и постоянного токов. Эти приборы точны, однако их показания зависят от наличия внешних магнитных полей, шкала у них неравномерная и достаточно велика потребляемая мощность.

Приборы других систем:

Тепловая система – принцип действия основан на изменении длины проводника при прохождении по нему тока. Эти приборы могут измерять и постоянные, и переменные токи.

Амперметры, вольтметры, гальванометры.

Амперметрами называются приборы, служащие для измерения величины тока. При измерениях амперметры включают в цепь последовательно, поэтому приборы должны иметь малое сопротивление, чтобы включение их не изменяло заметно величину тока в цепи.

Вольтметрами называют приборы, служащие для измерения напряжения в цепи. При измерениях вольтметр включается параллельно тому участку цепи, на концах которого хотят измерить падение напряжения. Сопротивление вольтметра должно быть велико по сравнению с сопротивлением участка цепи, на котором измеряют падение напряжения.

Гальванометрами называют приборы, весьма чувствительные, служащие для измерения малых токов (до 10^{-7} - 10^{-9} А), малых напряжений.

Для расширения пределов измерения амперметров и вольтметров применяются шунты и добавочные сопротивления.

Шунтом называют сопротивление ($R_{\text{ш}}$), включаемое в цепь параллельно амперметру (рис.4). При этом в цепь амперметра отвечается только часть измеряемого тока I_A . Другая часть тока $I_{\text{ш}}$ будет идти через шунт, при этом $I = I_A + I_{\text{ш}}$.

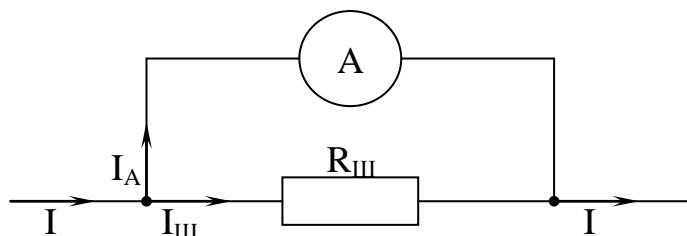


Рис. 4

В зависимости от соотношения сопротивления $R_{\text{ш}}$ и R_A , идущий по амперметру ток можно изменить в желаемое число раз. Например, если необходимо измерить амперметром ток в n раз больший максимально возможного для данного прибора, то нужно включить сопротивление в $(n - 1)$ раз меньшее $R_{\text{ш}} = R_A / (n-1)$, где $n = I/I_A$, I - величина тока в цепи, I_A - ток, идущий через амперметр (R_A - сопротивление амперметра).

Добавочное сопротивление применяется для расширения пределов измерения вольтметра и включается последовательно с ним (рис.5).

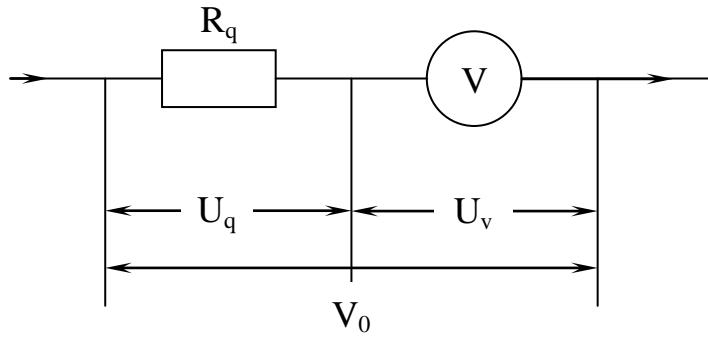


Рис.5

При подключении прибора V в цепь, напряжение распределится на добавочное сопротивление R_q , и на вольтметр U_v , так что $U_0 = U_q + U_v$.

В зависимости от соотношения сопротивления вольтметра R_v и добавочного сопротивления R_q напряжение, подаваемое на вольтметр, будет уменьшено. Если, например, необходимо измерить вольтметром в n раз большее напряжение, то необходимо включить последовательно с вольтметром добавочное сопротивление $R_q = R_v$ ($n - 1$), то есть в $(n - 1)$ раз большее, чем сопротивление вольтметра (где $n = U_0 / U_v$).

III. РЕОСТАТЫ, ПОТЕНЦИОМЕТРЫ, МАГАЗИНЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Для изменения силы тока в цепи применяются реостаты, чаще всего реостаты со скользящим контактом. При включении реостата так, как показано на рис. 7, он работает как потенциометр (делитель напряжения). Перемещая ползунок между клеммами K и D , можно изменить напряжение, подаваемое на лампу, от 0 до U_{max} .

Набор эталонных сопротивлений, представляющих собой катушки сопротивлений, называется магазином сопротивлений. Каждая катушка состоит из хорошо изолированной проволоки, изготовленной обычно из манганина или константана.

Рис.6

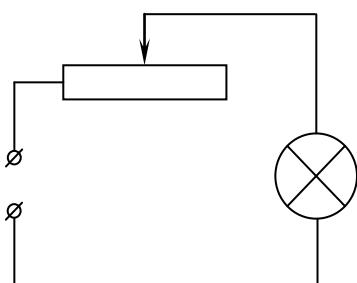
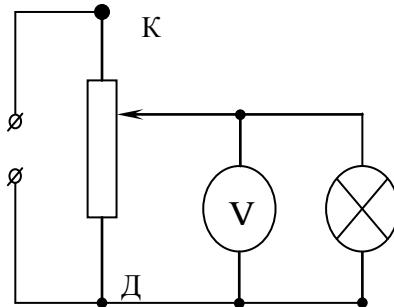


Рис.7



Сопротивление каждой катушки вполне определенное и мало изменяется под действием внешних факторов (в частности температуры). Подбором катушек можно набрать нужное сопротивление.

Измерительные приборы, электрическую схему которых можно переключать для изменения интервалов величины, называются многопредельными. В многопредельные амперметры внутрь прибора вмонтированы шунты, в случае вольтметра – добавочные сопротивления.

IV. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Абсолютная погрешность – под абсолютной погрешностью измерения понимается разность между истинным значением замеряемой величины и значением, полученным при данном измерении. При электрических измерениях абсолютная погрешность равна разности показания прибора и действительного значения измеряемой величины

$$\Delta A = A_{\text{пок. пр.}} - A_{\text{действ. знач.}}$$

Величина, обратная по знаку абсолютной погрешности, называется поправкой прибора $K = -\Delta A$. Относительная погрешность. Под ней понимается отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины.

$$\beta = \frac{\Delta A}{A_{\text{действ. знач.}}}$$

Для оценки точности показаний прибора вводится приведенная погрешность. Приведенная погрешность равна отношению максимальной абсолютной погрешности к максимальному значению измеряемой данным прибором величины:

$$\beta = \frac{\Delta A_{\max}}{A_{\max}} \cdot 100\%$$

Максимальная приведенная погрешность в процентах называется классом точности прибора. Эта величина является важнейшей характеристикой прибора и ее значение нанесено на лицевой панели прибора (0,1, 0,2, 0,5, 1,0, 1,5, 2,5, 4,0). Используя значение класса точности прибора, можно оценить абсолютную погрешность (поправку) измерения. Например: Класс точности вольтметра 0,5, максимальное значение измеряемой величины (предел измерения) $U_{\max} = 250 \text{ В}$, тогда:

$$\Delta U_{\max} = \beta \frac{U}{100} = \frac{0,5 \cdot 250 \text{ В}}{100} = 1,25 \text{ В}$$

V. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРАВИЛА СБОРКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

1. Электрические цепи собираются в соответствии с составленной принципиальной схемой (без наличия схемы собирать электрические цепи запрещается).
2. На электрической принципиальной схеме должны быть изображены все электрические элементы, необходимые для изучения и измерения заданных процессов и их контроля, все электрические связи между ними, а также элементы (разъемы, зажимы), которыми заканчиваются входные и выходные цепи (условные обозначения на схемах приведены в приложении 3).
3. При сборке разветвленной части цепи вначале собирают цепь из последовательно соединенных источников электрической энергии, измерительных приборов, устройств управления и коммутации, а затем к элементам этой (основной) цепи присоединяют другие элементы, подключаемые параллельно. В последнюю очередь включают обмотки вольтметров и параллельно обмотки ваттметров.
4. Когда на схеме имеются узлы, в которых соединено три и более проводников (рис.8), при сборке цепи под одним зажимом необходимо располагать не более 2-х проводников. В противном случае соединения получаются непрочными.

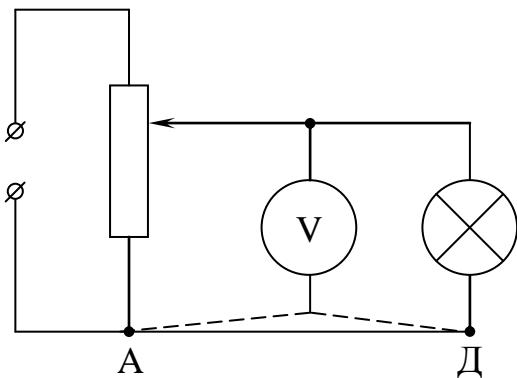


Рис.8

В этих случаях можно найти всегда точки с равными потенциалами, например: точки А и Д ($\phi_A = \phi_D$).

5. Если в цепи имеются регулирующие устройства (потенциометры, реостаты), то они должны быть установлены в такое положение, при котором ток или напряжение на соответствующих участках цепи будут наименьшими.
6. При наличии коммутирующих устройств последние должны быть выключены.

7. Собранную цепь проверяют и, в первую очередь, убеждаются, что при включении цепи под напряжение не произойдет короткого замыкания или ее режим работы не превысит расчетный режим.

8. Без разрешения преподавателя или лаборанта включение схем категорически запрещается.

VI. ОПИСАТЬ НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ.

Описание электроизмерительных приборов целесообразно проводить по следующей схеме:

1. Назначение прибора (см. приложение 1)

2. Род измеряемого тока

--- постоянный

~ переменный

≈ постоянный и переменный

3. Система измерительного механизма (см.приложение 2)

4. Класс точности прибора: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

5. Условия эксплуатации I , II , III , IV

а) защищенность от внешних магнитных полей. Меньшая цифра соответствует лучшей защищенности. 1 – защищенность от электрических и магнитных полей.

б) температурный режим работы

- от + 10 до 35 С, влажность до 80%

- от - 20 до 50 . влажность до 80%

- от - 40 до 60 , влажность до 98%

6. Положение прибора во время работы.

или ↑ вертикальное положение

или → горизонтальное положение

7. Напряжение при котором испытана изоляция обмоток

2кВ - прибор испытан на пробой изоляции при напряжении 2000 В.

8. Марка завода изготовителя, заводской номер, год выпуска.

1.2 Лабораторная работа № ЛР- 2 (2 часа)

Тема: «Цифровые мультиметры»

1.2.1 Цель работы:

1. Ознакомиться с принципом действия цифровых мультиметров.
2. Ознакомиться с правилами применения цифрового мультиметра и провести измерения электрических величин.

1.2.2 Задачи работы:

1. Ознакомиться с принципом действия цифровых мультиметров.
2. Ознакомиться с правилами применения цифрового мультиметра
3. Провести измерения электрических величин.

1.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Цифровой мультиметр DT 830 (или аналогичный)
2. Блок резисторов
3. Источник постоянного тока
4. Полупроводниковый фотоэлемент
5. Полупроводниковый диод
6. Лампа осветительная
7. Соединительные провода

1.2.4 Описание (ход) работы:

1. Цифровые мультиметры. Цифровые измерительные приборы наиболее широко применяются в мультиметрах широкого профиля. Типовой цифровой мультиметр выполняет все обычные функции аналогового измерительного прибора, но, как правило, с лучшим качеством. На рисунке приведена упрощённая структурная схема, по которой можно судить о принципе действия базового цифрового мультиметра.

Принцип действия мультиметров основан на преобразовании входного сигнала в цифровой код с последующей обработкой и индикацией измеряемой величины на жидкокристаллическом или светодиодном дисплее. Как видно из рисунка, мультиметр имеет три основных функциональных взаимосвязанных блока.

1. Блок измерительного преобразователя ИП преобразует входной сигнал, то есть измеренное значение напряжения, силы тока или др. величины, в сигнал, который затем поступает в **аналого-цифровой преобразователь АЦП**. Этот сигнал имеет форму, необходимую для работы АЦП. Обычно это постоянное напряжение 200 мВ или 2 В.

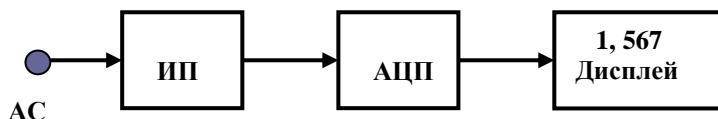


Рис. – Структурная схема базового цифрового мультиметра:

AC- аналоговый сигнал (входной сигнал); ИП – измерительный преобразователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

2. Аналого-цифровой преобразователь преобразует поступающий на его вход аналоговый сигнал, который эквивалентен входному сигналу, в цифровую форму, необходимую для индикации на дисплее.

3. Дисплей. Цифровая информация, полученная от аналого-цифрового измерительного устройства, передаётся на цифровое отсчётное устройство, которые выполняются в виде дисплеев, выполненных на жидких кристаллах или светоизлучающих диодах. Декодированная цифровая

информация индицируется на дисплее, который преобразуют код в показания , понятные человеку (в виде цифр).

Важной характеристикой дисплея является *разрядность* — число полных десятичных разрядов, которые индицируются цифрами от 0 до 9. Дисплеи, позволяющие индицировать еще один дополнительный разряд, но неполностью, называются отсчетными устройствами с расширенным диапазоном измерений. Их разрядность обозначается в виде $R_{\text{ou}} 1/2$. Это означает, что дисплей имеет R_{ou} полных разрядов и один неполный. В нем, как правило, может индицироваться только 0 или 1.

Схема мультиметра также содержит делители напряжения, токовые шунты, выпрямители переменного напряжения, преобразователи сопротивления, емкости, переключатель и др. элементы. Конструктивно мультиметры представляют собой портативные многофункциональные измерительные приборы, изготовленные из негорючих материалов в пластмассовом корпусе.

2. Цифровой мультиметр DT 830 (MS 830) - это карманный 3,5 разрядный цифровой мультиметр, предназначенный для измерения постоянного, переменного напряжения, постоянного тока, сопротивлений и для проверки диодов и транзисторов

Передняя панель

Переключатель функций и диапазонов. Это переключатель используется как для выбора функций и желаемого предела измерений, так и для выключения прибора. Для продления службы батареи переключатель должен быть в положение “OFF” когда прибор не используется.

Дисплей.3,5-зарядный 7-сегментный ЖКИ высотой 0,5 дюйма.

Разъём “COMMON”(общий). Разъём для чёрного (отрицательного) провода-щупа.

Разъём “V, Ω ,mA”. Разъём для красного (положительного) провода-щупа для измерения всех напряжений, сопротивлений и токов (кроме 10A).

Разъём “10A”. Разъём для красного (положительного) провода-щупа для измерения тока в диапазоне до 10A.

Общая инструкция

ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

- Подключите правый щуп к входу “V, Ω ,mA”, а чёрный к “COM”.
- Установите переключатель пределов измерений на требуемый предел DC V, если измеряемое напряжение заранее неизвестно установите переключатель на наибольший предел, а затем уменьшайте до тех пор, пока не получите необходимую точность измерений.
- Подсоедините щупы к исследуемой схеме или устройству.
- Включите питание исследуемой схемы или устройства, на дисплее возникнут полярность и величина измеряемого напряжения.

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

- Подключите правый щуп к входу “V, Ω ,mA”, а чёрный к “COM”.
- Установите переключатель пределов измерений на требуемый предел AC V
- Подсоедините щупы к исследуемой схеме или устройству.
- Считайте показания на дисплее.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

- Красный щуп на входу “V, Ω ,mA”, а чёрный на вход “COM”.
(Для измерений в диапазоне между 200 mA и 10A красный щуп подсоединить к входу “10A”.)
- Переключатель пределов установить на требуемый предел DC A
- Разомкнуть измеряемую схему и подсоедините щупы прибора последовательно с наг-

руской в которой измеряется ток.

4. Считайте показания на дисплее.

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

1. Красный щуп на вход “V, Ω, mA”, а чёрный на вход “COM”.
2. Переключатель пределов установить на требуемый предел измерения Ω .
3. Если измеряемое сопротивление находится в схеме то, перед измерениями выключите питание схемы и разрядите все конденсаторы.
4. Считайте показания на дисплее.

ДИОДНЫЙ ТЕСТ.

1. Красный щуп на вход “V, Ω, mA”, а чёрный на вход “COM”.
 2. Переключатель пределов установить в положение ►
 3. Подключить красный щуп к аноду а, чёрный щуп к катоду исследуемого диода.
 4. На дисплее появится значение величины прямого падения напряжения на диоде в mV. Если диод включен наоборот, то на дисплее будет “1”.
3. Провести измерения электрических величин:

Задание 1. Изучить инструкцию по применению цифрового мультиметра DT 830.

Задание 2. Измерить с помощью мультиметра DT 830:

а) э.д.с. гальванического элемента или батареи;

б) фото-э.д.с. и фототок короткого замыкания фотоэлемента при его освещении;

Задание 3. Измерить сопротивления резисторов и записать результаты измерений.

Задание 4. Последовательно соединить два низкоомных резистора и, измерив общее сопротивление, проверить соотношение $R_o = R_1 + R_2$.

Задание 5. Параллельно соединить два низкоомных резистора и, измерив общее

сопротивление, проверить соотношение $\frac{1}{R_o} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.

Задание 6. С помощью мультиметра определите анодный и катодный выводы полупроводникового диода.

Контрольные вопросы

1. Принцип работы цифрового мультиметра.
2. Нарисовать простейшую структурную схему цифрового мультиметра.
3. Что такое разрядность дисплея мультиметра?
4. При измерении на дисплее мультиметра высвечивается слева только цифра 1 (единица), других цифр нет. Что это означает?
5. Что означают сокращения DC, AC, COM, OFF на панели мультиметра?
6. Подготовьте прибор для измерения:
 - а) постоянного напряжения величиной 1,3 В
 - б) силы постоянного тока 120 мА, 50 мА, 5 А
 - в) переменного напряжения величиной 140 В
 - г) для измерения сопротивления 30 кОм
7. Выразите силу тока 28,6 мА в амперах (A), микроамперах (мкА).

1.3 Лабораторная работа № ЛР-3 (2 часа)

Тема: «Градуировка термопары»

1.3.1 Цель работы: градуировка термопары

2.3.2 Задачи работы:

1. Градуировка шкалы гальванометра в градусах
2. Определение цены деления гальванометра
3. Измерение температуры воздуха в комнате

1.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. гальванометр
2. два термометра
3. электроплитка
4. два калориметра
5. термопара константан-железо
6. регулятор переменного напряжения
7. соединительные провода.

1.3.4 Описание (ход) работы:

Термоэлектрические явления. При соприкосновении (контакте) двух проводников (металлов) свободные электроны вследствие теплового движения переходят из одного проводника в другой. Если соприкасающиеся проводники различны (например, у них разные концентрации свободных электронов) или если их температура в разных точках неодинакова, то оба потока диффузии электронов неодинаковы и один из проводников заряжается положительно, а другой отрицательно. Поэтому в пограничном слое между проводниками появляется электрическое поле, уравновешивающее разность диффузионных потоков.

Существование таких электрических полей обуславливает ряд электрических явлений, называемых термоэлектрическими. К термоэлектрическим явлениям (или эффектам) относятся явление Зеебека, явление Пельтье и явление Томсона.

Явление термоэдс или явление Зеебека – это возникновение электродвижущей силы (термоэдс) в электрической цепи, состоящей из последовательно соединённых разнородных проводников, если места контактов проводников поддерживаются при разных температурах (рис. 2). Явление было открыто немецким учёным Томасом Зеебеком в 1821 г.

Если цепь замкнута, то в ней течёт электрический ток, называемый термотоком I_T . Причём изменение знака разности температур вызывает изменение направления термотока . Цепь, составленная из двух различных проводников (M_1, M_2), называется **термопарой** или **термоэлементом**, а сами проводники - её ветвями или **термоэлектродами**. Контакты проводников А и В, создаваемые обычно путём сварки или пайки, часто называют спаями (рис. 1).

Величина термоэдс ε_T зависит от абсолютных значений температур спаев T_0 и T , разности этих температур ΔT и от природы материалов, составляющих термопару.

Однако в небольшом интервале температур термоэдс ε_T можно считать пропорциональной разности температур спаев ΔT и некоторому коэффициенту α , называемому коэффициентом термоэдс или удельной термоэдс.

$$\varepsilon_T = \alpha(T - T_0) \quad (1)$$

Здесь T и T_0 - температуры спаев термопары.

Коэффициент термоэдс ε_T для данной пары проводников (ветвей термопары) численно равен величине термоэдс, возникающей в термопаре при разности температур $\Delta T = 1\text{K}$. Он определяется в первую очередь материалами ветвей термопары, но зависит также и от интервала температур, в котором используется термопара. В некоторых случаях с изменением температуры коэффициент термоэдс ε_T даже меняет знак. В таблице 1 приведены значения коэффициентов термоэдс для термопар из часто применяемых металлов и сплавов.

Данные, приведенные в таблице 1 не следует считать абсолютно достоверными, так как термоэдс любого материала очень чувствительна к ничтожному количеству примесей, термической или даже холодной обработке материала.

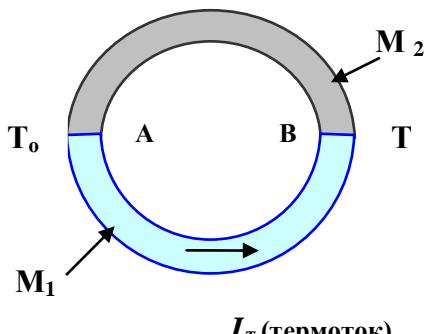
Возникновение термоэдс обусловлено тремя причинами:

1. *Температурной зависимостью внутренней контактной разности потенциалов.* Это следует, например, из выражения (1). Величина термоэдс термопары равна алгебраической сумме контактных разностей потенциалов, возникающих в спаях А и В.

$$\varepsilon_T = U_{iA} + U_{iB} \quad (2)$$

Таблица 1
Характеристики некоторых металлических термопар

Тип термопары	Диапазон рабочих температур, °C	Коэффициент термоэдс, мкВ/°C
Медь-константан ТМКн	0 - 400	40 - 60
Хромель-копель ТХК	0 - 600	64 - 88
Хромель-алюмель ТХА	0 - 1300	35 - 42
Железо-константан ТЖК	0 - 800	50 - 64
Платинародий-платина ТПП10	600 - 1600	10 - 14
Вольфрамний-вольфрамний	1300 - 2500	14 - 7



Если оба спая термопары находятся при одинаковой температуре, то контактные разности потенциалов в спаях А и В равны, но направлены в противоположные стороны и компенсируют друг друга. Если же температура спаев различна, то будут неодинаковы и внутренние контактные разности потенциалов $U_{iA} \neq U_{iB}$, что ведёт к нарушению электрического равновесия в цепи и возникновению контактной термоэдс ε_K .

Рис. 1 – Изображение термопары

2. *Вторая причина обуславливает составляющую термоэдс, называемую диффузионной или объёмной. Она вызвана неоднородным распределением температуры в проводнике.*

На рис.2 показан однородный металлический проводник в виде стержня, у которого есть горячий конец А и холодный конец В. В этом случае концентрация электронов с более высокой энергией у нагретого конца А будет больше, чем у холодного, а концентрация электронов с более низкой энергией будет , наоборот, у нагретого конца меньше. Поэтому возникнет диффузия более быстрых электронов к холодному концу, а более медленных – к горячему.



Рис. 2 – Возникновение термоэдс в однородном неравномерно нагретом проводнике.

$$T_A > T_B$$

Диффузионный поток быстрых электронов будет больше, чем поток медленных электронов. Поэтому вблизи холодного конца образуется избыток электронов (минус), а вблизи горячего – их недостаток (плюс). В результате внутри проводника возникнет электрическое поле E , направленное от горячего конца к холодному. Оно будет уменьшать поток быстрых электронов и увеличивать поток медленных электронов.

Когда оба потока выровняются в каждом сечении наступит равновесное состояние, а между концами проводника появится разность потенциалов $\Delta\varphi$, которая и представляет диффузионную составляющую термоэдс ε_d .

3. Существует третий источник термоэдс – действие на электроны проводимости звуковой (упругой) волны. В неравномерно нагретом проводнике возникает звуковая (упругая) волна, которая распространяется от горячего конца к холодному и передающая энергию электронам. В результате её действия вблизи холодного конца будет накапливаться отрицательный заряд, а у горячего – положительный заряд, создающие дополнительную составляющую термоэдс. Однако вклад её в термоэдс значителен лишь при низких температурах.

В практических важных случаях термоэдс, возникающая в явлении Зеебека, представляет алгебраическую сумму контактной ε_k и диффузионной составляющей ε_d , которые обычно противоположны по знаку.

Применение явления Зеебека

1. Измерение температуры. Явление Зеебека широко используется для измерения температур, а также при других измерениях, которые могут быть сведены к измерению температуры. Например, при измерении энергии светового потока, в электроизмерительных приборах (термоприборах) – для измерения токов радиочастот и т.д.

Термочувствительным элементом в приборах для измерения температуры является термопара. Термопара состоит из двух последовательно соединённых пайкой или сваркой разнородных металлических проводников M_1 и M_2 (рис.3,4). В сочетании с измерительным прибором (милливольтметром, гальванометром или цифровым электроизмерительным прибором) термопара образует *термоэлектрический термометр*, шкала которого градуируется в градусах. Измерительный прибор или электронную измерительную систему подключают либо к концам термоэлектродов (рис.3), либо в разрыв одного из них (рис.4).

Во втором случае при измерении один контакт (спай) поддерживается при постоянной температуре, обычно путём помещения его в тающий лёд, температура которого $T_o = 0^\circ\text{C}$. Этот спай называется спаем сравнения или холодным. Другой спай приводят в контакт с веществом, температуру T которого измеряют. Второй спай называют измерительным, рабочим или горячим.

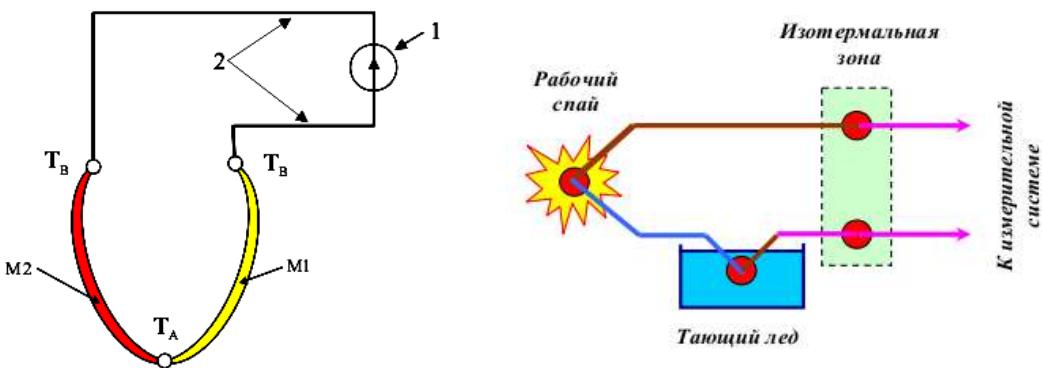


Рис.3 – Прямое подключение термопары M_1M_2 к измерительному прибору 1,
2 – соединительные проводники

Рис.4 – Подключение термопары к измерительной системе. Спай сравнения (холодный) помещён в тающий лёд.

Величину возникающей термоэдс в некотором интервале температур можно описать выражением (1) $\varepsilon_T = \alpha(T - T_0)$. Поскольку для данной термопары коэффициент термоэдс известен, как и температура спая сравнения T_0 , то неизвестная температура определяется выражением

$$T = T_0 + \frac{\varepsilon_T}{\alpha} \quad (3)$$

Если же коэффициент термоэдс α зависит от температуры и зависимость термоэдс ε_T от ΔT нелинейная, то выражение (5) использовать нельзя. Необходимо провести градуировку термопары.

2. Термоэлектрические генераторы тока. Явление Зеебека (термоэдс) используют в *термоэлектрических генераторах – энергетических устройствах для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую*. Соединяя термопары (или термоэлементы) последовательно или параллельно, получают термобатареи, которые являются генераторами электроэнергии. Однако, из-за малых значений термоэдс металлических термопар к.п.д. таких термогенераторов очень низок (примерно 0,1 %) и они не нашли применения в технике.

Современные термогенераторы изготавливают из полупроводниковых материалов, поскольку термоэдс полупроводниковых термоэлементов (термопар) намного больше, чем у металлических. В состав таких термоэлектрических генераторов входят термобатареи, набранные из полупроводниковых термоэлементов, соединённых последовательно или параллельно, и теплообменники горячих и холодных спаев термобатареи. В качестве материала для ветвей термоэлементов широко применяются полупроводниковые соединения германия с кремнием Ge-Si и полупроводниковая модификация силицида железа β – FeSi₂. Источником тепловой энергии в термогенераторах могут быть: газ, бензин, уголь, ядерный реактор, радиоизотопный источник энергии, солнечная энергия, тепло человеческого тела.

Термоэлектрические генераторы применяются для энергоснабжения удаленных и труднодоступных потребителей электроэнергии (автоматических маяков, навигационных буев, метеорологических станций, активных ретрансляторов, космических аппаратов).

Максимальный к.п.д. современных термогенераторов из-за тепловых потерь не превышает 10 %, хотя теоретически можно достичь к.п.д. преобразования $\eta = 15\%$.

ЗАДАНИЕ 1. Градуировка шкалы гальванометра

1. Собрать установку согласно рисунку 5.
2. Наполнить оба калориметра тающим льдом или холодной водой, имеющей одинаковую

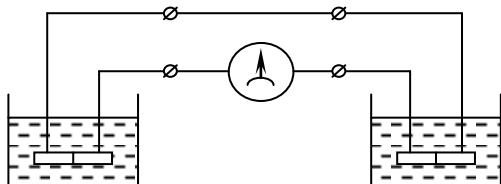


Рис.5

температуру. Погрузить в них термопары и термометры. Отсчитать показания обоих термометров и гальванометра (в делениях шкалы) и записать их в заранее заготовленную таблицу 2.

3. Поставить внутренний сосуд одного из калориметров на плитку и подогреть воду в нем примерно на 10°C , в этот момент сделать второй отсчет показаний гальванометра и внести в таблицу. Далее проделать такие же отсчеты примерно через каждые 10 градусов до тех пор, пока не будет пройден весь интервал температур от 0 до 100°C .
4. По данным таблицы 2 построить график зависимости показаний гальванометра от разности температур спаев, откладывая на оси абсцисс разность температур спаев, а на оси ординат – показания гальванометра. Если график окажется прямой линией, то зависимость между разностью температур и силой тока может быть выражена формулой:

$$T - T_o = k n \quad (4)$$

где T_o - температура холодной воды, T - температура нагретой воды,
 n - отсчет гальванометра, k - цена деления гальванометра.

5. Под ценой деления шкалы гальванометра – « k » термопары нужно понимать разность между температурой одного (измерительного) спая T и температурой другого спая (сравнения) T_o , соответствующую одному делению шкалы гальванометра. По значениям таблицы 2 вычислить среднюю цену деления гальванометра.

ЗАДАНИЕ 2. Определение температуры воздуха в комнате

Для определения неизвестной температуры при линейной зависимости между разностью температур спаев и силой тока, можно воспользоваться средней ценой деления гальванометра.

Неизвестная температура определяется по формуле (4). В случае иной зависимости необходимо пользоваться только полученным графиком.

В качестве примера определения температуры можно измерить температуру воздуха в комнате. Для этого одну термопару погружают в калориметр, наполненный тающим снегом или холодной водой, а другую, хорошо просушенную, в воздух комнаты.

Записывается показание гальванометра и по графику определяется температура воздуха в комнате.

Таблица 2

№ п/п	Температура холодной воды T_0 , °C	Температура нагретой воды T , °C	$T - T_0$, °C	Показания гальвано- метра n	Цена деления гальвано метра $k = \frac{T - T_0}{n}$	Среднее значение цены деления k_{cp}

Сделать выводы о проделанной работе

Контрольные вопросы

1. Что такое внутренняя контактная разность потенциалов и чем она обусловлена?
2. Какие явления называют термоэлектрическими?
3. В чём состоит явление Зеебека? Что такое термоэлектродвижущая сила?
4. Причины возникновения термоэдс в явлении Зеебека.
5. Как зависит от температуры термоэдс?
6. Какая величина называется коэффициентом термоэдс? В каких единицах измеряется?
7. Что такое термопара и как она устроена?
8. Какие способы включения термопары существуют?
9. Применение явления Зеебека.

1.4 Лабораторная работа № ЛР-4 (2 часа)

Тема: «Измерение индукции магнитного поля»

1.4.1 Цель работы: Измерение индукции магнитного поля постоянного магнита с помощью баллистического гальванометра.

1.4.2 Задачи работы:

1. Ознакомиться с методом измерения.
2. Проделать необходимые измерения и расчёты.
3. Определить абсолютную и относительную погрешности измерений индукции B .

1.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. магнит подковообразный.
2. проволочная катушка.

3. гальванометр баллистический
4. линейка измерительная

1.4.4 Описание (ход) работы:

Индукцию однородного магнитного поля можно определить, если воспользоваться явлением электромагнитной индукции. Явление электромагнитной индукции было открыто английским физиком Майклом Фарадеем в 1831 г. Оно заключается в возникновении электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении во времени магнитного потока Φ , пронизывающего этот контур.

В однородном магнитном поле магнитным потоком Φ через площадь S называют величину, определяемую выражением

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha \quad (2)$$

где B - модуль вектора магнитной индукции;

S - площадь;

α - угол между вектором B и нормалью n к плоскости контура (рис. 2).

Магнитный поток Φ измеряют в веберах. 1 Вб (вебер) = 1 Тл м².

При изменении магнитного потока, пронизывающего проводящий контур, в нём возникает э.д.с. индукции, вызывающая протекание электрического (индукционного) тока. Величина э.д.с. ε_i определяется законом электромагнитной индукции и равна

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

где $\frac{d\Phi}{dt}$ - скорость изменения магнитного потока через контур, знак минус показывает направление э.д.с. индукции ε_i .

В данной лабораторной работе нужно измерить величину индукции магнитного поля между полюсами постоянного подковообразного магнита (рис.). В этой области его магнитное поле можно считать однородным. Контуром служит проволочная цилиндрическая катушка диаметром D , на которую намотано N витков.

Если расположить катушку между полюсами магнита таким образом, что плоскость катушки перпендикулярна линиям магнитной индукции (рис.), то магнитный поток Φ через неё будет равен

$$\Phi = B \cdot S \cdot N \quad (4)$$

где B - модуль индукции магнитного поля,

S - площадь поперечного сечения катушки, равная площади витка,

N - число витков катушки.



Рис. - Схема опыта

При быстром удалении катушки из магнитного поля (магнит быстро удаляется) за время Δt магнитный поток через катушку изменяется от первоначального значения (формула 4) до нуля. Модуль э.д.с. электромагнитной индукции, возникающей в катушке в течение этого времени определяется выражением

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi}{\Delta t} = \frac{BSN}{\Delta t} \quad (5)$$

Если концы катушки замкнуты на гальванометр, то при удалении магнита в её цепи протекает индукционный ток I , который определяется законом Ома для полной цепи.

Разделив э.д.с. индукции на полное сопротивление цепи R , получим $I = \frac{\varepsilon_i}{R} = \frac{BSN}{R \cdot \Delta t}$

Умножив силу тока I на время Δt , получим величину электрического заряда Δq , прошедшего через катушку.

$$\Delta q = I \cdot \Delta t = \frac{BSN}{R}$$

Откуда следует $B = \frac{\Delta q \cdot R}{N \cdot S}$ (6)

Порядок выполнения работы

- Подготовьте в тетради таблицу для записи результатов измерений и вычислений.

Опыт №	D (м)	S (м ²)	N	R (Ом)	n	Δq (Кл)	B (Тл)	B_{cp} (Тл)
1								
2								

- Измерьте диаметр D катушки, вычислите площадь S ее поперечного сечения и сосчитайте число N витков в ней. Запишите указанное сопротивление R .
- Присоедините выводы катушки к зажимам гальванометра. Шкала гальванометра проградуирована в кулонах. Введите катушку в магнитное поле постоянного магнита, расположив её плоскость перпендикулярно линиям индукции магнитного поля (рис.).
- Быстро удалите магнит и заметьте число делений n , на которое отклоняется стрелка гальванометра по шкале. Повторите опыт ещё четыре раза.
- Используя измеренные значения Δq и известные значения S, N, R по формуле (6), вычислите индукцию B магнитного поля постоянного магнита для каждого опыта.
- Определите среднее значение магнитной индукции B_{cp} . Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.
- Вычислите абсолютную и относительную погрешности измерений магнитной индукции B .
- Сделайте вывод о проделанной работе.

1.5 Лабораторная работа № ЛР-5 (2 часа)

Тема: «Измерение радиоактивного излучения»

1.5.1 Цель работы:

- Ознакомиться с явлением радиоактивности.
- Изучить принцип работы и правила применения дозиметра радиоактивного излучения.

1.5.2 Задачи работы:

- Ознакомиться с явлением радиоактивности.
- Изучить принцип работы и правила применения дозиметра радиоактивного излучения.

излучения.

3. Измерение радиационного фона и мощности дозы радиоактивного излучения.

1.5.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Индикатор радиоактивности «Радекс».
2. Кювета с минеральным удобрением «Калий сернокислый» или радиоактивный препарат из учебного набора.
3. Штатив лабораторный.

1.5.4 Описание (ход) работы:

Задание 1. Изучить теоретическое введение и записать основные необходимые сведения (основные определения, законы, формулы и контрольные вопросы).

1. Строение атомного ядра. Атомное ядро любого химического элемента состоит из протонов (p) – положительно заряженных частиц и из нейтронов (n) – частиц, не имеющих электрического заряда. Протоны и нейтроны имеют общее название – нуклоны. Заряд протона равен модулю заряда электрона. Число протонов в ядре совпадает с порядковым номером химического элемента в периодической системе элементов, обозначается буквой **Z** и называется **зарядовым числом**. Число нейтронов в ядре обозначается буквой **N**. Общее число протонов **Z** и нейтронов **N** в ядре называется **массовым числом A**.

$$A = Z + N$$

Атом химического элемента обозначается символом **X**, а его ядро символом $\frac{A}{Z}X$, где **A** – массовое число, **Z** – зарядовое число ядра. Заряд ядра равен **Ze**, здесь **e** – элементарный заряд. Например, в состав ядра гелия входят два протона и два нейтрона, поэтому его символ $\frac{4}{2}He$.

Атомы с одним и тем же зарядом ядра Ze, но с разным массовым числом A называются изотопами. Ядра изотопов химического элемента содержат одинаковое число протонов **Z**, но разное число нейтронов **N**. Изотопы имеют одинаковое строение электронных оболочек атомов, практически одинаковые химические свойства и занимают одно и то же место в Периодической системе элементов Д.И.Менделеева. У каждого химического элемента в большинстве случаев существует постоянное содержание различных изотопов. **Изотопы гелия:** $\frac{4}{2}He$, $\frac{3}{2}He$, $\frac{6}{2}He$.

Ядра атомов представляют собой устойчивые образования, хотя между положительными протонами существует кулоновское отталкивание. Устойчивость ядер означает, что между нуклонами в ядрах действуют особые силы притяжения, значительно большие сил кулоновского отталкивания между протонами. **Силы притяжения, удерживающие протоны и нейтроны в атомном ядре, называют ядерными силами.**

Ядерные силы имеют неэлектростатическую природу. Для них характерна зарядовая независимость, то есть силы взаимодействия протона с нейтроном, нейтрона с нейтроном и протона с протоном примерно одинаковы. Ядерные силы короткодействующие, они проявляются лишь на малых расстояниях, порядка 10^{-15} м. Кроме того им свойственно насыщение, когда каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов.

2. Радиоактивность. В 1896 г. французский физик А.Беккерель установил, что соли урана испускают невидимое проникающее излучение (лучи), которое не было известно в то время. Вещества, испускающие эти излучения, были названы **радиоактивными**, а

свойство вещества, связанное с наличием этих излучений, - **радиоактивностью**.

Исследования показали, что радиоактивность сопровождается превращением химических элементов и не зависит от того, находится ли вещество в виде чистого элемента или соединения, а также от внешних условий (температуры, давления и др.). Отсюда следует, что радиоактивность является свойством атомных ядер.

Радиоактивность – явление самопроизвольного (спонтанного) превращения атомных ядер в другие ядра с испусканием различных видов излучений. Различают естественную и искусственную радиоактивность. Естественная радиоактивность наблюдается у неустойчивых (нестабильных) изотопов, существующих в природе. Искусственная радиоактивность наблюдается у изотопов, полученных в ядерных реакциях.

Радиоактивное излучение по составу неоднородно. Было обнаружено, что излучение, испускаемое радиоактивным элементом, в магнитном поле разделяется на три вида, которые назвали α – излучение (лучи), β – излучение, γ – излучение (рис.1).

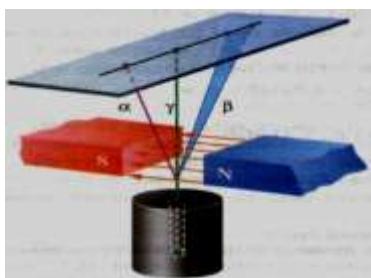


Рис.1 - Схема расщепления в магнитном поле радиоактивного излучения

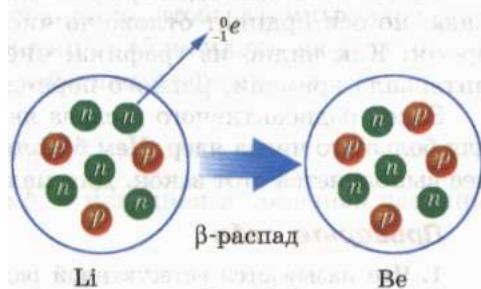


Рис. 2 – Схема β – распада ядра лития Li

Дальнейшие исследования установили природу радиоактивных излучений.

α (альфа) – излучение представляет собой поток ядер гелия 4_2He , обладающих высокой энергией. Это излучение отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью.

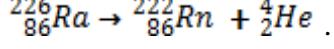
β (бета) – излучение представляет поток быстрых электронов. Оно также отклоняется электрическим и магнитным полями, его ионизирующая способность значительно меньше, а проникающая способность гораздо больше, чем у α – частиц.

γ (гамма) – излучение представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение с очень малой длиной волны $\lambda < 10^{-10}$ м. Оно обладает ярко выраженными корпускулярными свойствами и потому является потоком частиц, называемых γ (гамма)-квантами. При испускании γ – излучения параметры ядра не меняются, ядро лишь переходит в состояние с меньшей энергией. Это излучение не отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает относительно слабой ионизирующей способностью и очень большой проникающей способностью.

Радиоактивные превращения атомных ядер, сопровождающиеся испусканием α – и β – излучений, называют α – распадом и β – распадом, соответственно. Ядро, испытывающее радиоактивный распад, называют **материнским**, а ядро, возникающее после распада называют **дочерним**.

Испускание α – частицы материнским ядром приводит к образованию дочернего ядра, массовое число которого меньше на 4 единицы, чем у исходного A. При этом зарядовое число у дочернего ядра меньше на 2 единицы, чем у исходного, материнского ядра Z, то есть в результате α – распада порядковый номер элемента в таблице

Менделеева уменьшается на две единицы. Например, при испускании α – частицы ядром радия ($Z=88$, $A=226$) возникает ядро радона ($Z=86$, $A=222$) согласно уравнению:



При β – распаде материнское ядро превращается в дочернее с таким же массовым числом A . Массовое число не изменяется, поскольку масса испускаемого электрона очень мала. А зарядовое число Z увеличивается на единицу, то есть порядковый номер у нового, дочернего ядра на единицу больше, чем у исходного, материнского. При β – распаде в ядре происходит превращение нейтрона в протон. Например, при β – распаде ядра изотопа лития 3_3Li возникает ядро бериллия 4_4Be согласно уравнению: $^3_3Li \rightarrow ^4_4Be + ^0_{-1}e$ (рис.2).

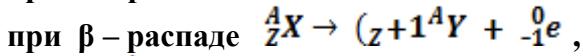
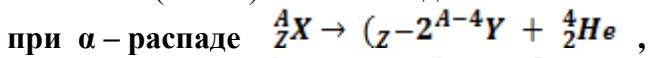
При испускании γ (гамма) – излучения в ядре происходит перегруппировка нуклонов, при которой зарядовое Z и массовое A числа не изменяются.

В общем виде смещение ядер в Периодической таблице элементов при радиоактивных распадах подчиняется **правилам смещения**:

Правило 1. Сумма зарядовых чисел возникающих ядер и частиц равна зарядовому числу исходного, материнского ядра.

Правило 2. Сумма массовых чисел возникающих ядер и частиц равна массовому числу исходного, материнского ядра.

Правила смещения являются следствием законов сохранения зарядового (заряда) и массового (массы) чисел. В виде символьических уравнений они записываются так:



здесь A_ZX – символ исходного, материнского ядра, Y – символ дочернего ядра, 4_2He – символ ядра изотопа гелия, $^0_{-1}e$ – символ электрона.

Получившееся в результате радиоактивного распада дочернее ядро может оказаться также радиоактивным, последующие тоже и и так далее. В результате возникает целый ряд радиоактивных превращений элементов. В природе известны три радиоактивных ряда или семейства, родоначальниками которых являются изотопы урана и тория, . Конечным продуктом во всех этих случаях являются изотопы свинца.

Число радиоактивных ядер уменьшается со временем. **Закон радиоактивного распада**

имеет вид:
$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

где N_0 – начальное число радиоактивных ядер, N – число нераспавшихся ядер в момент времени t , λ – постоянная радиоактивного распада. Закон радиоактивного распада является статистическим и выполняется только для очень большого числа радиоактивных ядер.

Для характеристики продолжительности жизни радиоактивных ядер применяется величина, называемая периодом полураспада $T_{1/2}$. **Период полураспада – это время, в течение которого распадается половина первоначального числа радиоактивных ядер.** Период полураспада связан с постоянной радиоактивного распада λ выражением

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \text{ Используя период полураспада, закон радиоактивного распада можно}$$

$$\text{записать в виде: } N = N_0 2^{\frac{t}{T}} \quad (2)$$

Периоды полураспада радиоактивных изотопов лежат в широком диапазоне, от миллионных долей секунды до миллиардов лет и более. Из-за относительно малого периода полураспада химические элементы, расположенные в Периодической таблице за

уроном (трансурановые), не сохранились в земной коре. Химические элементы с $Z > 92$ получают искусственным путём.

На рисунке 3 приведен график, иллюстрирующий закон радиоактивного распада. По оси ординат отложено число радиоактивных ядер N , по оси абсцисс – время t . Как видно, число нераспавшихся ядер в течение любого интервала времени, равного периоду

$T_{1/2}$, уменьшается в два раза.

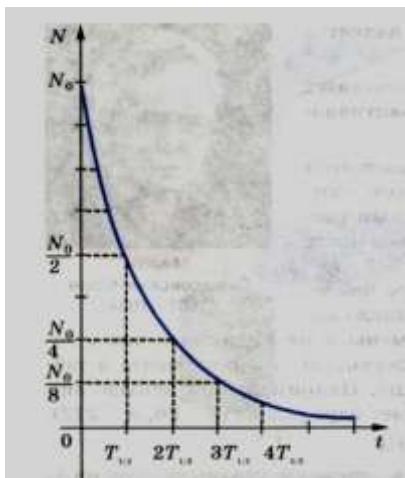


Рис.3 – График зависимости числа нераспавшихся радиоактивных ядер N от времени t

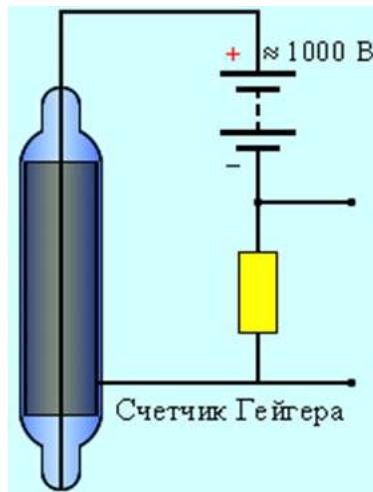


Рис.4 – Электрическая схема счётчика Гейгера

3. Приборы для регистрации радиоактивных излучений и частиц.

Взаимодействуя с веществом радиоактивное излучение проявляет различные свойства: оказывает химическое действие; вызывает ионизацию газов, а иногда и твёрдых тел и жидкостей; возбуждает люминесценцию (свечение) некоторых твёрдых и жидких тел; оказывает сильное биологическое действие на живые организмы. На свойствах радиоактивных излучений основаны экспериментальные методы их обнаружения, исследования и измерения.

Измерение характеристик ионизирующих излучений, от которых зависят радиационные эффекты в облучаемых объектах живой и неживой природы, называется **дозиметрией**. Приборы, применяемые для измерения уровня и характеристик радиоактивных излучений называются **дозиметрами**. Основным элементом любого дозиметра является **счётчик Гейгера**, который позволяет регистрировать радиоактивные излучения по их ионизирующей способности.

Счётчик Гейгера –Мюллера относится к группе газоразрядных счётчиков. Конструктивно он представляет собой герметически запаянную трубку, к внутренним стенкам которой прилегает тонкий металлический цилиндр – катод К (рис. 4). По оси трубы проходит тонкая металлическая проволока, которая служит анодом А. Трубка заполнена газом. Между катодом и анодом прикладывается высокое напряжение, поэтому заряженная частица, влетая в трубку, ионизирует на своём пути молекулы газа. Электроны, двигаясь к положительно заряженной проволоке (аноду), ускоряются электрическим полем, вызывая лавинную ионизацию других молекул. На резисторе R возникает импульс напряжения, то есть электрический сигнал, который поступает на вход специальной электрической схемы (пересчётной схемы), которая фиксирует попадание частицы в счётчик.

4. Биологическое действие радиоактивных излучений. Под радиоактивным излучением понимают гамма- и рентгеновское излучение, потоки электронов, протонов, α -частиц, ионов тяжёлых элементов. Их источниками являются космическое излучение и радиоактивные изотопы, содержащиеся в атмосфере, почве, строительных материалах, которые образуют естественный радиационный фон. Кроме того, существуют мощные техногенные источники излучения, особенно в развитых странах. К ним относятся: ядерные реакторы АЭС, научные и технологические ускорители заряженных частиц, рентгеновские и другие медицинские установки.

Радиоактивные излучения оказывают сильное биологическое действие на ткани живого организма, заключающееся в ионизации атомов и молекул вещества. Возбуждённые атомы и ионы обладают сильной химической активностью, поэтому в клетках организма появляются новые химические соединения, чужды здоровому организму. Под действием ионизирующей радиации разрушаются сложные молекулы и элементы клеточных структур. В человеческом организме нарушается процесс кроветворения, приводящий к дисбалансу белых (лейкоцитов) и красных (эритроцитов) кровяных телец. Человек заболевает белокровием или так называемой лучевой болезнью. Большие дозы облучения приводят к смерти. Радиоактивные излучения опасны ещё и тем, что даже их большие дозы не воспринимаются органами чувств, отсутствуют болевые ощущения.

Характер воздействия ионизирующего излучения зависит от дозы поглощённого излучения и его вида. **Дозой поглощённого излучения называется отношение энергии излучения E , поглощённой облучаемым телом, к его массе m .**

$$D = \frac{E}{m}$$

Единица дозы поглощённого излучения – 1 Гр (грей) = 1 Дж/кг. Это доза поглощённого излучения, при которой веществу массой 1 кг передаётся энергия излучения 1 Дж.

При одной и той же дозе поглощённого излучения разные виды излучения вызывают неодинаковый биологический эффект. Различие биологического действия разных видов излучения характеризуют коэффициентом относительной биологической активности (КОБА) или коэффициентом качества k . Коэффициент качества k рентгеновского и гамма-излучения принят за единицу. А биологический эффект любого ионизирующего излучения сравнивают с эффектом от рентгеновского и гамма-излучения. Например, коэффициент качества электронного излучения $k = 1 - 1,5$; для медленных нейтронов он составляет $k = 3 - 5$, а для альфа-излучения $k = 20$.

Для оценки действия излучения на живые организмы применяется специальная величина – эквивалентная доза, которая равна произведению дозы поглощённого излучения на коэффициент качества.

$$H = D \cdot k$$

Единица измерения эквивалентной дозы – 1 Зв (зиверт). 1 Зв равен эквивалентной дозе, при которой доза поглощённого гамма-излучения равна 1 Гр (грею). Величина эквивалентной дозы определяет относительно безопасные и очень опасные для живого организма дозы облучения: допустимая доза облучения $D < 0,25$ Гр; доза облучения, вызывающая лучевую болезнь 1 - 6 Гр; смертельная доза облучения 6 – 10 Гр.

На практике до сих пор используется внесистемная единица экспозиционной дозы – **рентген (Р).** Рентген – это единица экспозиционной дозы фотонного (электромагнитного) излучения, при прохождении которого через 0,001293 г воздуха создаются ионы, несущие определённый электрический заряд. В системе Си 1 Р = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг.

Поэтому для оценки интенсивности ионизирующего излучения часто применяют в качестве единицы мощности дозы 1 мкР/час. На территории Российской Федерации естественный фон гамма-излучения изменяется в широких пределах: от 5 до 60 мкР/ч.

Задание 2. Ознакомиться с устройством и правилами пользования индикатором радиоактивности (дозиметра) «Радекс».

Индикатор радиоактивности состоит из счётчика Гейгера; регистрирующей системы, включающей пересчётную схему, которая фиксирует попадание частицы в счётчик; дисплей и батарейный отсек. Все устройства заключены в пластмассовый корпус, имеющий вентиляционные прорези. Сквозь левые прорези виден счётчик Гейгера. На верхней панели индикатора находится дисплей и три кнопки, с помощью которых осуществляется управление устройством. Внешний вид индикатора показан на рис.5.

Большая кнопка «Выкл» (на рис.5 – 4) имеет четыре функции: включение и выключение, включение подсветки ЖК-дисплея (1) и возврат в меню.

Кнопка «Меню» (на рис.5– 2) имеет три функции: «Меню» (для входа в меню), «Выбор» и «Измен» (осуществляется выбор пункта меню и его изменение).

Кнопка «Курсор» (на рис.5 – 3) используется в меню для перемещения курсора.

Включение индикатора осуществляется нажатием большой кнопки «Выкл», выключением – продолжительным нажатием этой кнопки.

Работа в меню. Меню позволяет устанавливать удобные настройки: выбор единицы измерения мкЗв/ч или мкР/ч в разделе «Размерность», порог звуковой индикации, включение подсветки.

Порядок и правила измерения

1. Для включения индикатора следует нажать большую кнопку. После этого начинается оценка радиационной обстановки. В течение времени измерения каждый регистрируемый квант сопровождается индикацией на дисплее и коротким звуковым сигналом, если звук включен и отключен порог.
2. Через 10 секунд после включения на дисплее появится первый результат короткого цикла. Наиболее достоверный результат выводится на дисплей после первого цикла измерения, занимающего 40 секунд и отображаемого пиктограммой в виде стороны квадрата « I ». Последующие 40- секундные циклы индицируются такими же пиктограммами. Пиктограмма в виде квадрата соответствует четырём и более циклам измерения.

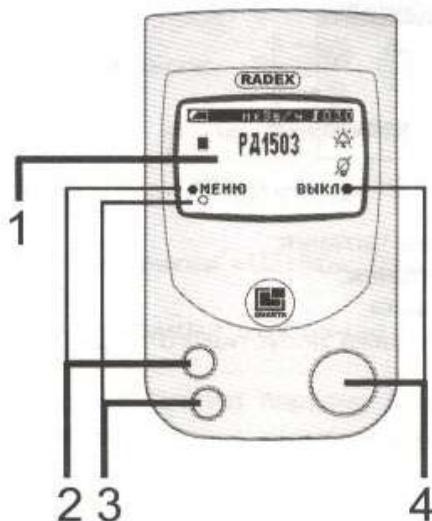


Рис.5 – Внешний вид индикатора радиоактивности «Радекс»

3. Действие ионизирующего излучения имеет статистический, вероятностный характер, поэтому показания индикатора в одинаковых условиях не могут оставаться строго постоянными. Для достоверного определения уровня мощности дозы (радиации) следует проводить от 3 до 5 циклов измерения.
4. При определении радиоактивной загрязнённости продуктов питания, бытовых предметов и т.д. следует приблизить индикатор к объекту обследования на расстояние 5 – 10 мм левой боковой стороной с прорезями и включить индикатор.
5. Радиационное обследование жидкостей проводится над открытой поверхностью жидкости. Для защиты индикатора от попадания в него жидкости в подобных случаях нужно использовать полиэтиленовый пакет (однослойный).
6. Для определения места расположения источника ионизирующего излучения следует перемещать включенный индикатор над поверхностью обследуемого объекта, ориентируясь на частоту звуковых сигналов. В этом случае в настройках меню: звонок – включен, а порог –отключен. Частота звуковых сигналов по мере приближения к источнику будет резко возрастать, а по мере удаления так же резко убывать.
7. Если индикатор зафиксировал мощность дозы более 1,2 мкЗв/ч, следует срочно покинуть эту зону !

Задание 3. Измерить с помощью индикатора радиоактивности «Радекс» мощность дозы естественного радиационного фона в аудитории, на 1-ом этаже учебного корпуса и мощность дозы радиоактивного излучения, исходящего от кюветы с минеральным удобрением, используя единицы измерения мкР/ч и мкЗв/ч. Сравнить полученные результаты и объяснить их. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Из каких частиц состоят ядра атомов?
2. Что называют зарядовым числом, массовым числом?
3. Что такое изотопы? Напишите изотопы водорода и гелия.
4. Назовите химический элемент, в ядре которого содержится: а) 2 протона и 2 нейтрона
5. протона и 4 нейтрона в) 6 протонов и 6 нейтронов г) 7 протонов и 7 нейтронов
6. Что называют радиоактивностью?
7. Что представляет собой альфа-излучение, бета-излучение и гамма-излучение?
Некоторые свойства этих излучений.
8. Как изменяются заряд и масса ядра при α – распаде, при β – распаде, при испускании ядром γ – излучения ? Правила смещения.
9. Сформулируйте закон радиоактивного распада и запишите его формулу. Что такое период полураспада и чему равна его величина у разных изотопов?
10. Можно ли предсказать, когда распадётся одно из пяти имеющихся радиоактивных ядер?
11. Какая доля радиоактивных элементов распадается за время, равное двум периодам полураспада?
12. Какая доля радиоактивных атомов останется не распавшейся спустя время, равное трём периодам полураспада?
13. За 6 часов число атомов радиоактивного изотопа уменьшилось в 2 раза. Во сколько раз оно уменьшится за сутки, считая от начального момента времени?
14. Устройство, назначение и принцип действия счётчика Гейгера.
15. Что называется дозой поглощённого излучения? Единица измерения.
16. Что называется эквивалентной дозой излучения? Единица измерения.
17. Биологическое действие радиоактивных излучений.

1.6 Лабораторная работа № ЛР-6 (2 часа)

Тема: «Структура кристаллов и рентгеновская дифракция»

1.6.1 Цель работы:

1. Ознакомиться с дифракцией рентгеновских волн на кристаллических структурах.
2. Методика изучения структуры и фазового состава поликристаллических веществ с помощью дифракции рентгеновских волн.

1.6.2 Задачи работы:

1. Структура кристаллических твёрдых тел.
2. Дифракция рентгеновских волн на кристаллических решётках.
3. Рентгеноструктурный и рентгенофазовый методы изучения кристаллических веществ.
4. Принципы рентгенофазового анализа вещества.

1.6.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Мультимедийный проектор.
2. Компьютер
3. Рентгеновский минидифрактометр МД-10.
4. Рентгеновская трубка.

1.6.4 Описание (ход) работы:

1. Структура кристаллических твёрдых тел.

Кристаллом называют твердое тело, атомы (ионы или молекулы) которого образуют упорядоченную, периодически повторяющуюся в пространстве кристаллическую решётку (структуру). В основе кристаллической решётки лежит элементарная кристаллическая ячейка, имеющая вид параллелепипеда с характерным для данной решётки расположением атомов (рис. 1). Элементарная ячейка представляет собой наименьшую повторяющуюся объемную структуру кристаллической решётки, полученную мысленным соединением атомов кристалла прямыми линиями. Транслируя, то есть, осуществляя параллельный перенос этого параллелепипеда вдоль трех независимых направлений, можно получить весь кристалл (рис.2).

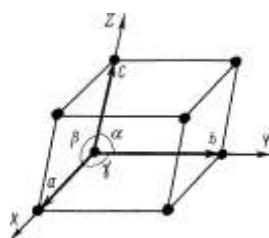


Рис.1

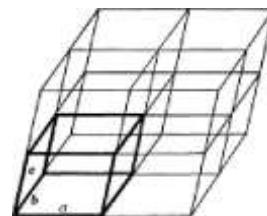


Рис.2

Элементарная ячейка описывается с помощью трех сторон – ребер a, b, c , исходящих из одной вершины параллелепипеда и трех плоских углов α, β, γ между ними (рис.1). Направления, определяемые ребрами элементарной ячейки, называются кристаллографическими осями, а длина элементарной ячейки вдоль одной из осей обычно определяется как постоянная (или период) кристаллической решётки. В вершинах этого параллелепипеда, называемых узлами, находятся атомы или группы атомов вещества.

Различают примитивные (простые), базоцентрированные, объемноцентрированные и гранецентрированные решетки Браве. Если узлы кристаллической решетки расположены только в вершинах параллелепипеда, представляющего собой элементарную ячейку, то такая решетка называется примитивной или простой. Если, кроме того, имеются узлы в центре основания параллелепипеда, то решетка называется базоцентрированной, если есть узел в месте пересечения пространственных диагоналей – решетка называется объемноцентрированной, а если имеются узлы в центре всех боковых граней – гранецентрированной.

По форме ячейки в зависимости от углов между ее гранями α , β , γ и от соотношения между величиной ребер a , b , c различают семь кристаллических систем (сингоний): 1) правильная или кубическая; 2) гексагональная; 3) тетрагональная; 4) тригональная или ромбоэдрическая; 5) ромбическая; 6) моноклинная и 7) триклиновая (рис.3 – 9). В кристаллах кубической системы (рис. 3) возможны три решетки: простая, объемноцентрированная и гранецентрированная. В кубической системе все углы элементарной ячейки прямые и все ребра ее равны между собой.

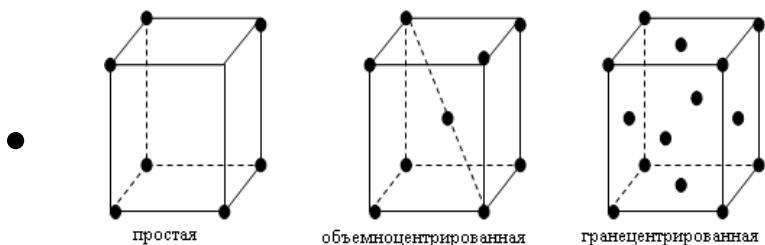


Рис. 3 – Кубическая система и её решетки. $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, $a = b = c$

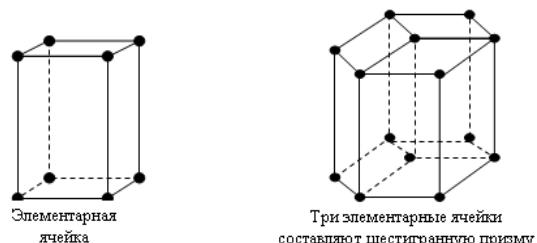


Рис. 4 – Гексагональная система. $\alpha = \gamma = 90^\circ$, $\beta = 120^\circ$, $a = c \neq b$

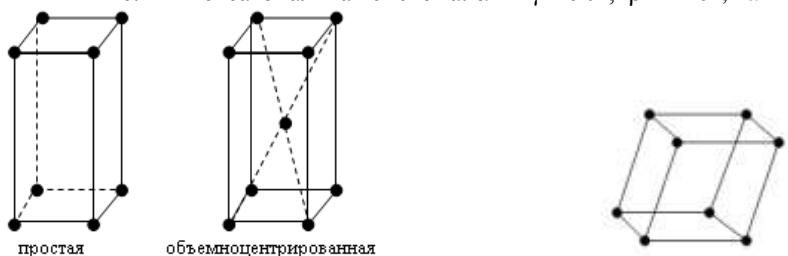


Рис. 5 – Тетрагональная система и её решетки.
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, $a = b \neq c$

Рис. 6 – Тригональная (ромбоэдрическая) система. $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$, $a = b = c$

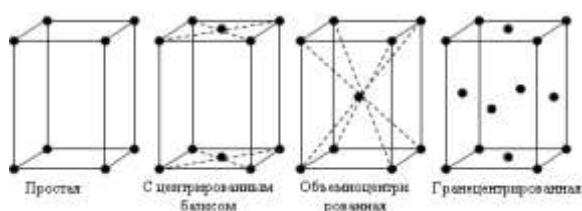


Рис. 7 – Ромбическая система и её решетки. $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, $a \neq b \neq c$

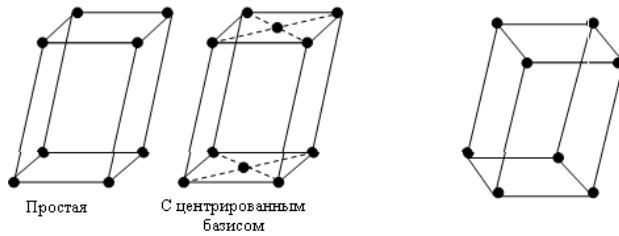


Рис. 8 – Моноклинная система и её решетки.
 $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma \neq 90^\circ$ $a \neq b \neq c$

Рис. 9 – Триклиническая система.
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ $a \neq b \neq c$

Для описания свойств кристаллов важно правильно определять положение и ориентацию атомных плоскостей в кристалле, то есть плоскостей, в которых лежат его атомы. В кристаллографии для этого обычно используют особые числа, называемые индексами Миллера, которые определяются следующим образом.

Выберем систему координат, оси которых совпадают с тремя ребрами элементарной кристаллической ячейки. Начало координат находится в одном из узлов, в котором пересекаются эти ребра, а осевые единицы соответствуют длине ребер кристаллической ячейки, то есть масштаб по оси X будет a , по оси Y будет b и по оси Z – c (рис. 10).

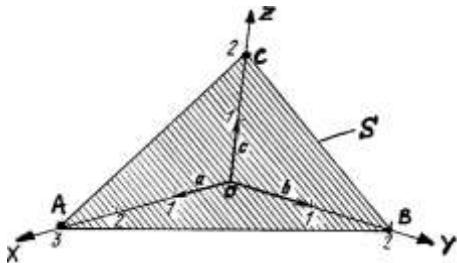


Рис. 10 – Определение положения атомной плоскости
в кристалле с помощью индексов Миллера

Положение любой плоскости в пространстве определяется тремя точками. В выбранной системе координат удобно в качестве трех опорных точек взять точки пересечения заданной плоскости с осями координат.

Пусть определяемая плоскость S пересекает оси координат в точках A , B и C и отсекает по осям отрезки, выраженные в соответствующих единицах как $OA = m \cdot a$, $OB = n \cdot b$, $OC = p \cdot c$. Эти три числа m , n , p вполне определяют положение плоскости S в кристалле (рис. 10). Для определения индексов Миллера нужно взять величины, обратные значениям полученных чисел m , n , p и привести их к наименьшему, целому числу, кратному каждому из этих чисел. Следовательно, для индексов Миллера, обозначаемых h , k , l , соблюдается следующее соотношение

$$h : k : l = 1/m : 1/n : 1/p$$

и для нахождения индексов h , k , l нужно отнести отношение $1/m : 1/n : 1/p$ к общему знаменателю и отбросить его. Индексы Миллера атомных плоскостей заключаются в круглые скобки $(h k l)$, знак отношения между индексами не ставится. Для случая, соответствующего рисунку 10, индексы Миллера плоскости S есть (233) и читаются как “два, три, три”.

Числа m , n , p могут быть и дробными, но индексы Миллера и в этом случае будут представлены целыми числами. Следует отметить, что набор индексов (hkl) может означать отдельную плоскость или семейство параллельных плоскостей, поэтому индексы

Миллера по существу определяют кристаллографическую ориентацию. Некоторые наиболее важные плоскости кубического кристалла и их индексы Миллера показаны на рисунке 11.

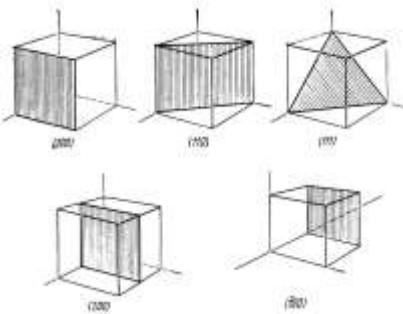


Рис. 11 – Некоторые плоскости кубического кристалла
и их индексы Миллера

2. Дифракция рентгеновских волн на кристаллических решётках.

Рентгеновское излучение (лучи) было открыто в 1895 г. немецким физиком В. Рентгеном и представляет собой электромагнитные волны с длиной волны в вакууме, составляющей от 0,001 нм до 10 нм. Дифракция рентгеновских лучей в общем аналогична дифракции видимого света на дифракционной решётке.

Однако, наблюдать дифракцию рентгеновских лучей в тех же условиях, что и для видимого света невозможно по той причине, что обычные препятствия и отверстия, используемые в оптике слишком велики по сравнению с длиной волны рентгеновских лучей. Кристаллы же, являясь трехмерными пространственными решетками, имеют постоянную решетку (то есть, межатомные расстояния) порядка 10^{-10} м и, следовательно, могут использоваться в качестве естественной дифракционной решетки для рентгеновского излучения.

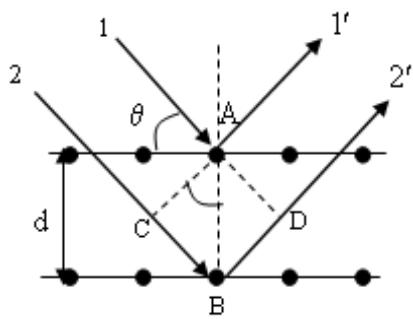
Возникающие вторичные волны когерентны и способны к интерференции. Поэтому для наблюдения отраженного от кристалла излучения необходимо, чтобы в результате интерференции произошло усиление вторичных волн.

Найдем условие такого усиления. Для этого вычислим разность хода рентгеновских лучей 1 и 2, отраженных от двух соседних атомных плоскостей кристалла в данном направлении (рис. 12). Линии на этом рисунке соответствуют атомным плоскостям, а точки представляют собой атомы кристалла. Здесь θ – угол скольжения лучей, d – межплоскостное расстояние. Любой дифрагированный луч (1' или 2') можно рассматривать как результат отражения от одной из этих плоских систем – как будто этот рентгеновский луч был отражен зеркалом, параллельным этим плоскостям. При наблюдении отражения излучения необходимо, чтобы для лучей 1 и 2 выполнялось условие интерференционного максимума, приведенное ниже. Эти лучи не будут гасить друг друга лишь при условии, что разность хода лучей Δ составит целое число длин волн.

$$\Delta = n\lambda$$

Оптическую разность хода лучей 1 и 2 можно записать в виде:

$$\Delta = CB + BD = d \cdot \sin \theta + d \cdot \sin \theta = 2d \cdot \sin \theta$$



Δ - оптическая разность хода отраженных рентгеновских лучей,
 n - целое число (1, 2, 3 ...), называемое порядком отражения или дифракции,
 λ - длина волны рентгеновского излучения

Рис. 12 – К выводу условия Вульфа - Брэгга

Отсюда получается соотношение, которое независимо друг от друга получили русский ученый Г.В.Вульф и английские ученые Г.Брэгг и Л.Брэгга и называется условием Вульфа – Брэгга.

$$2d \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda \quad (4)$$

Из этого выражения видно, что максимальное интерференционное усиление рентгеновских волн происходит только в определенных направлениях и зависит от расстояния между атомами и от длины волны (частоты) рентгеновского излучения. Отраженное рентгеновское излучение наблюдается только при выполнении условия Вульфа – Брэгга (4).

3. Рентгеноструктурный и рентгенофазовый методы изучения кристаллических веществ. Соотношение Вульфа – Брэгга используется для решения двух важных задач:

1. Наблюдая дифракцию рентгеновских лучей неизвестной длины волны λ на кристаллической структуре при известном d и измеряя θ и n , можно найти длину волны падающего рентгеновского излучения λ . Этот метод лежит в основе рентгеновской спектроскопии и в практикуме не рассматривается.

2. Наблюдая дифракцию рентгеновских лучей известной длины волны на кристаллической структуре неизвестного строения и измеряя θ и n , можно найти межплоскостное расстояние d и определить структуру вещества. Этот метод лежит в основе *рентгеноструктурного анализа*. Он также позволяет осуществлять идентификацию исследуемого вещества, его состав (фазовые составляющие) и количественное содержание фаз, образующих сложное вещество, то есть составляет основу *рентгенофазового анализа*.

Существует несколько методов получения дифракционного эффекта в исследуемом веществе (образце). Для изучения структуры и состава кристаллических веществ широко используется *метод порошка* или *метод Дебая – Шеррера*. Этот метод заключается в том, что изучаемым веществом является поликристаллическое вещество (металлы, сплавы, минералы) или порошок из монокристаллических зерен, который освещается монохроматическим рентгеновским излучением.

Большинство твёрдых тел являются поликристаллическими, то есть состоят из огромного числа хаотически расположенных мелких кристалликов (кристаллитов). При освещении такого поликристаллического образца (рис.13) монохроматическим рентгеновским излучением с длиной волны λ в образце всегда найдётся множество кристалликов, у которых система

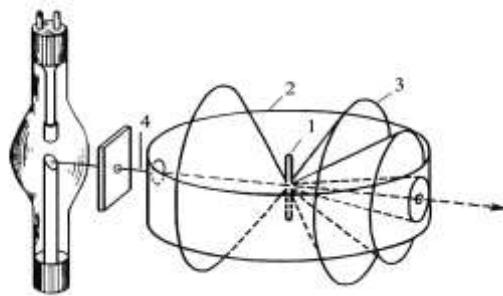


Рис. 13 - Схема дифракционной картины, получаемой по методу порошка (метод Дебая -Шеррера). Слева – рентгеновская трубка, 1 – поликристаллический образец, 2 – контуры рентгеновской камеры, 3 – дифракционный конус, 4 – падающий на образец рентгеновский луч.

параллельных атомных плоскостей с данными межплоскостными расстояниями d будет составлять с падающим рентгеновским лучом угол θ , удовлетворяющий уравнению Вульфа – Брэгга (4) и равный

$$\theta = \arcsin \frac{n\lambda}{2d}$$

Поскольку один и тот же угол θ с первичным (падающим на образец) рентгеновским пучком 4 могут иметь кристаллики образца с разной азимутальной ориентацией, то рентгеновские отражения от них суммарно создают конус рентгеновских лучей с углом при вершине 4θ , показанный на рис. 14. Если на пути такого конуса отраженных лучей поставить узкую изогнутую полоску фотопленки, то на ней возникнут две симметричные тёмные линии (рис. 15).

Так как в кристаллах можно провести целый ряд различных параллельных кристаллографических (атомных) плоскостей с разными межплоскостными расстояниями d_i , то им будут соответствовать различные углы скольжения θ_i , удовлетворяющие условию (4). Вся рентгеновская (дифракционная) картина имеет вид совокупности таких конусов с разными углами полураствора $2\theta_i$ (рис. 13). На рентгеновской фотоплёнке они оставляют след в виде совокупности пар дужек, симметрично расположенных относительно центрального пятна, созданного первичным (неотклонённым) рентгеновским пучком (рис. 15).

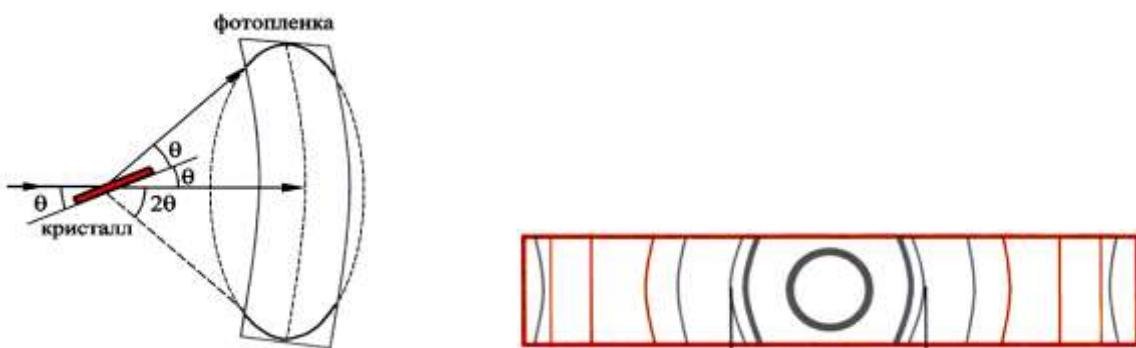


Рис. 14 – Схема образования конуса отраженных рентгеновских лучей. Отражение происходит от системы параллельных атомных плоскостей под углом скольжения θ .

Рис. 15 – Вид дифракционной картины, возникающей на фотоплёнке. Центр картины – место падения на фотоплёнку первичного неотклонённого рентгеновского луча.

При изучении поликристаллических веществ широко применяются рентгеновские аппараты иной конструкции, которые называются *рентгеновскими дифрактометрами*. В

них вместо фотоплёнки для регистрации дифракционной картины, получаемой от образца, используется детектор рентгеновского излучения (счётчик).

Дифракционная картина, получаемая с помощью дифрактометра имеет вид зависимости интенсивности рентгеновского излучения от удвоенного угла дифракции 2θ , как это показано на рис. 16 для корунда Al_2O_3 . Подобный график называется *дифрактограммой или рентгенодифракционным спектром*.

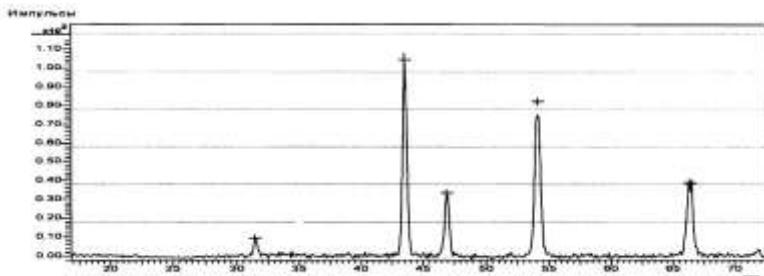


Рис. 16 – Дифрактограмма корунда Al_2O_3 . По горизонтали - угол 2θ , по вертикали – интенсивность дифракционных линий.

1. Рентгеновский фазовый анализ основан на том, что каждое кристаллическое вещество или фаза имеет свою специфическую кристаллическую решетку. Семейства атомных плоскостей, образующих эту решетку, обладают своим, характерным только для данной решетки набором значений межплоскостных расстояний d_{hkl} . Поэтому каждой кристаллической фазе на рентгеновской дифрактограмме соответствует своя система дифракционных линий.

2. Дифрактограмма многофазного поликристаллического вещества содержит дифракционные линии всех фаз, входящих в состав вещества, то есть представляет собой результат наложения друг на друга дифрактограмм отдельных фаз.

Определяя из дифрактограммы положения рентгеновских отражений, то есть углы рассеяния $2\theta_i$, по формуле Вульфа – Брэгга определяется набор межплоскостных расстояний d_i , для каждого кристалла или кристаллической фазы, входящей в состав изучаемого вещества. Сравнение полученных из экспериментальной дифрактограммы межплоскостных расстояний с их табличными значениями позволяет однозначно идентифицировать фазы изучаемого вещества, то есть определить его *качественный фазовый состав*. Межплоскостные расстояния для различных неорганических фаз имеются в ряде справочников и специальных картотеках.

3. *Рентгеновский количественный анализ* (определение количества какой-либо или ряда фаз в многофазном веществе) поликристаллических веществ, помимо первых двух положений, основан также на том, что интенсивность дифракционных максимумов в первом приближении пропорциональна содержанию фазы в смеси. С увеличением содержания фазы в многофазном веществе интенсивность её дифракционных линий возрастает.

Анализ основан на количественном сравнении интенсивности дифракционных линий разных фаз друг с другом или с интенсивностью линии эталона (стандартного, хорошо изученного вещества), снимаемого в тех же условиях. *Сравниаемые линии называются аналитическими*. Обычно, аналитической линией какой-либо фазы служит линия с наибольшей интенсивностью и свободная от наложения других дифракционных линий. Для выделения аналитических линий необходимо предварительно провести качественный фазовый анализ.

1.7 Лабораторная работа № ЛР-7 (2 часа)

Тема: «Рентгеновский дифрактометр»

1.7.1 Цель работы: ознакомиться с оборудованием для съемки дифрактограмм и изучить устройство рентгеновского минидифрактометра МД-10.

1.7.2 Задачи работы:

1. Изучить устройство и действие рентгеновской трубки.
2. Изучить устройство, функциональное назначение узлов (частей) минидифрактометра МД-10 и его работой.

1.7.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Мультимедийный проектор.
2. Компьютер
3. Рентгеновский минидифрактометр МД-10.
4. Рентгеновская трубка.
5. Техническое описание минидифрактометра МД-10.

1.7.4 Описание (ход) работы:

1. Изучить теоретическое введение и описание лабораторной работы.
2. Изучить устройство и действие рентгеновской трубки. Зарисовать основные элементы рентгеновской трубки и пояснить ее действие.
3. Ознакомиться с расположением основных блоков минидифрактометра и их назначением.
4. Зарисовать оптическую схему минидифрактометра МД-10 (рис. 4) в тетрадь и обозначить её основные узлы.
5. Изучить разделы «Задача от рентгеновского излучения» и «Меры безопасности при работе с минидифрактометром МД-10».
6. Написать отчёт о выполненной работе. В отчёте должны быть приведены:
 - сущность метода рентгенофазового анализа, условие Вульфа – Брэгга;
 - назначение минидифрактометра МД-10 и метод, применяемый в приборе для изучения структуры вещества;
 - рисунок рентгеновской трубки и оптической схемы дифрактометра;
 - назначение и тип рентгеновского детектора, применяемого в приборе;
 - основные элементы блока источника рентгеновского излучения.
7. Ответить на контрольные вопросы.

Примечание. При выполнении работы следует также ознакомиться с техническим описанием и инструкцией по эксплуатации минидифрактометра МД-10.

1. Устройство и действие рентгеновской трубки

Источником излучения в рентгеновской аппаратуре является рентгеновская трубка.

Рентгеновская трубка представляет собой высоковольтный электровакуумный прибор с двумя электродами: катодом и анодом (рис. 1).

Рентгеновское излучение возникает в результате резкого торможения быстро движущихся электронов об анод рентгеновской трубы. Электроны разгоняются электрическим полем, которое создается высоким напряжением, приложенным между электродами. Поэтому для возбуждения рентгеновского излучения в рентгеновских трубках должно быть обеспечено: а) получение свободных электронов; б) сообщение свободным электронам большой кинетической энергии (от нескольких тысяч эВ до 1–2 МэВ);

в) возбуждение быстрыми электронами атомов вещества анода.

Рентгеновские трубы классифицируются по следующим признакам.

1. По способу создания и поддержания вакуума различают трубы запаянные и разборные. В запаянных трубах высокий вакуум создается при их изготовлении и сохраняется в течение всего периода эксплуатации благодаря герметичности их корпуса (баллона). В баллоне создается высокий вакуум с давлением остаточных газов $1,33 \cdot 10^{-3}$ – $1,33 \cdot 10^{-5}$ Па.

2. По назначению. Различают трубы для просвечивания материалов и изделий, для структурного анализа и для медицинских целей.

3. По величине (площади) фокуса. Фокусом трубы называют площадку на аноде, на которую падают электроны и от которой испускаются рентгеновские лучи. Трубы изготавливают с нормальным (6 – 10 мм^2) и острым ($0,001$ – $0,01$ мм^2) фокусом.

Основным типом рентгеновских трубок, применяемых для просвечивания и структурного анализа, являются запаянные электронные трубы, схема которых показана на рис. 1.

Вольфрамовая спираль 1, разогретая током накала до 2100° – 2200° С, испускает электроны, которые, ускоряясь электрическим полем, устремляются с большой скоростью к аноду 4. Ударяясь о площадку в торце анода, электроны резко тормозятся. Почти вся кинетическая энергия тормозящихся электронов превращается в тепловую энергию. Лишь примерно 1% их кинетической энергии при этом превращается в энергию электромагнитных волн – рентгеновских лучей.

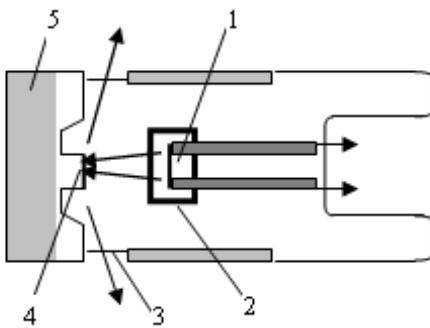


Рис. 1 – Схема запаянной рентгеновской трубы:

1 – катод, 2 – фокусирующий колпачок, 3 – окна для выпуска рентгеновских лучей, 4 – анод, 5 – защитный цилиндр.

Относительно мягкие рентгеновские лучи, испускаемые обычно трубками для структурного анализа (длина волны $\lambda \geq 0,1$ нм) очень сильно поглощаются стеклом. Поэтому для выпуска рентгеновских лучей из трубы в баллоны этих трубок впаивают специальные окна, изготовленные либо из сплава гетан, содержащего легкие элементы (бериллий, литий, бор), либо из металлического бериллия.

Катод в электронных трубках представляет собой обычно вольфрамовую спираль, часто покрываемую слоем тория для повышения эмиссионных характеристик. Спираль помещают в так называемый фокусирующий колпачок. Назначение колпачка – сузить пучок электронов, летящих с катода на анод, и уменьшить фокус трубы.

Анод представляет собой полый массивный цилиндр, изготовленный из материала с высокой теплопроводностью, чаще всего из меди. В трубках для структурного анализа на торцевую стенку анода наносят слой того металла, излучение которого (характеристическое или сплошное) используют для получения дифракционной картины при решении конкретных задач рентгеноструктурного анализа. Наиболее распространены трубы с анодами из хрома, железа, ванадия, кобальта, никеля, меди, молибдена, вольфрама.

2. Рентгеновский дифрактометр

Рентгеновские лучи, падая на кристаллическое вещество, рассеиваются его атомами и, складываясь, формируют дифракционную картину. Параметры дифракционной картины (углы θ) связаны с периодами кристаллической решетки формулой Вульфа – Брэгга.

$$2d \cdot \sin\theta = n\lambda \quad (1)$$

Поэтому измеряя дифракционные углы отраженных лучей θ , можно по этой формуле определить совокупность расстояний между атомными плоскостями d и составить геометрическую модель решетки кристалла. Интенсивность лучей, отраженных каждой системой атомных плоскостей, определяется сортом образующих её атомов и характером их расположения в элементарной ячейке кристаллической решетки.

Для изучения структуры и фазового состава твердых веществ путем определения параметров дифракционной картины, образуемой в результате взаимодействия изучаемого вещества с рентгеновским излучением, широко используют рентгеновские дифрактометры. **Рентгеновский дифрактометр – это прибор, позволяющий точно измерить углы дифракции рентгеновских лучей θ и одновременно определить интенсивность рентгеновского излучения, рассеянного на каждый угол.**

Метод получения дифракционного эффекта. Оптическая схема дифрактометра.

Существует несколько методов получения дифракционного эффекта в исследуемом веществе (образце). Для изучения структуры и состава кристаллических веществ с помощью рентгеновских дифрактометров широко используется *метод порошка* или *метод Дебая – Шеррера*. Этот метод заключается в том, что изучаемым веществом является поликристаллическое вещество или порошок из монокристаллических зерен, который освещается монохроматическим рентгеновским излучением.

На рисунке 2 показан ход рентгеновских лучей в дифрактометре, приводящих к образованию дифракционной картины. Монохроматическое излучение от рентгеновской трубки с линейчатым фокусом F падает на поликристаллический образец P , содержащий кристаллики (кристаллиты) всевозможных ориентаций. Среди огромного множества кристалликов образца имеются и такие, ориентации которых удовлетворяют условию Вульфа – Брэгга. Это приводит к образованию дифракционного (отраженного) луча, попадающего на приемную щель счетчика – детектора рентгеновского излучения D . Вращая счетчик – детектор по кругу вокруг образца P (верхнему), можно попасть в другие отражающие положения. Поскольку в поликристаллическом образце присутствуют кристаллиты всех возможных ориентаций, дифракционный спектр, полученный этим методом, является полным.

Геометрической характеристикой каждого дифракционного (отраженного) луча в этом методе является угол между направлением дифракционного (отраженного) луча и первичным (падающим) рентгеновским пучком, всегда равный 2θ (рис. 2). Для того, чтобы в отражающее положение попало возможно большее число кристаллических зерен поликристаллического образца, последний обычно вращают вокруг его оси.

По геометрии полученной в дифрактометре дифракционной картины можно судить о геометрии кристаллической решетки, а по интенсивности дифракции – о распределении атомов в элементарной ячейке.

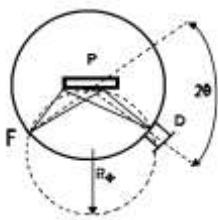


Рис. 2 – Ход лучей в плоскости фокусировки дифрактометра: F – фокус рентгеновской трубки, P – образец, D – приемная щель детектора, R_ϕ – радиус фокусирующей окружности, 2θ – угол между направлением падающего рентгеновского луча и направлением дифракционного луча

В рентгеновском дифрактометре регистрация дифракционной картины осуществляется с помощью различных счетчиков (детекторов) квантов рентгеновского излучения. Зафиксированную с помощью счетчика зависимость интенсивности рассеянных (отраженных) рентгеновских лучей от угла 2θ называют дифрактограммой или рентгенодифракционным спектром (более современное название), примеры которой можно найти в приложении 1. Регистрация дифракционной картины с применением в качестве детектора ионизационного или сцинтиляционного счетчика позволяет просто определять углы дифракции интерференционных максимумов и измерять интенсивность отраженного излучения.

Каждому дифракционному максимуму, зарегистрированному при значениях углов $2\theta_1, 2\theta_2 \dots 2\theta_i$ соответствует межплоскостное расстояние $d_1, d_2 \dots d_i$, то есть для каждого вещества сразу получается набор межплоскостных расстояний, сопоставляя который с табличными данными различных веществ, можно по их совпадению определить изучаемое вещество или выделить его в смеси других кристаллических фаз.

В большинстве современных дифрактометров для регистрации квантов рентгеновского излучения применяются сцинтиляционные блоки детектирования.

Сцинтиляционный счетчик состоит из кристалла – сцинтиллятора (кристалл йодида натрия, активированный таллием) и фотоэлектронного умножителя – ФЭУ. Рентгеновские кванты, попадая на сцинтиллятор, вызывают в нем сцинтиляции, вспышки видимого света. Вспышки света улавливаются фотокатодом ФЭУ, который в результате фотоэффекта испускает электроны. За счет вторичной электронной эмиссии на динодах, умножительных электродах ФЭУ, фототок усиливается примерно до 10^{-6} А, образуя на выходе ФЭУ импульсы напряжения, подаваемые на электронное счетно – регистрирующее устройство. С помощью сцинтиляционного счетчика можно измерять интенсивность рентгеновского излучения до $5 \cdot 10^5$ имп/с.

Сравнительно недавно появились позиционно – чувствительные газоразрядные детекторы ПЧГД рентгеновского излучения, которые уже широко используются в основном в портативной рентгеновской аппаратуре.

Позиционно – чувствительные газоразрядные детекторы ПЧГД относятся к классу ионизационных пропорциональных счётчиков рентгеновского излучения и содержат резистивный анод. Анод счетчика представляет собой стеклянную нить диаметром 50 – 100 микрон, покрытую резистивным рабочим слоем с удельным сопротивлением ~ 2 кОм/мм. На резистивный слой нанесен высокоомный защитный слой. Рабочее и защитное покрытия выполнены на основе олова и сурьмы. Через окно детектора, изготовленного из прозрачного для рентгеновского излучения материала (бериллий, слюда) рентгеновские кванты проникают в объём детектора и ионизируют атомы газа – наполнителя. Между анодом и катодом детектора приложено постоянное напряжение.

Электрические импульсы, возникающие в детекторе при поглощении рентгеновских квантов несут информацию о месте поглощения рентгеновского излучения и его интенсивности. Координата поглощённого рентгеновского кванта на ните – аноде определяется путём анализа длительностей передних фронтов сигналов, снимаемых с двух концов резистивного анода детектора. Система регистрации рентгеновского излучения, применяемая с ПЧГД, позволяет одновременно регистрировать пространственное распределение потока рентгеновских квантов вдоль рабочего окна детектора и их энергетический спектр. Созданы и применяются разные конструкции позиционно – чувствительных детекторов: линейные и изогнутые детекторы, как отпаянного, так и проточного типа.

Разработка позиционно – чувствительных детекторов привела к появлению нового класса дифрактометров, в которых для регистрации дифракционной картины применяются детекторы этого вида . К новому поколению дифрактометров относится и рентгеновский минидифрактометр МД-10.

Блок-схема дифрактометра

Современные рентгеновские дифрактометры обязательно содержат три крупных узла (рис. 3).

1. Высоковольтный источник питания, предназначенный для подвода к рентгеновской трубке высокого напряжения (до 60 кВ) и напряжения накала катода. Сила тока трубы составляет до 50 мА.

2. Дифрактометрический узел, состоящий из рентгеновской трубы в защитном кожухе, держателя образца и блока детектирования.

3. Счетно – регистрирующее и управляющее устройство, в котором регистрируются импульсы напряжения, вырабатываемые счетчиком при попадании в него каждого кванта рентгеновского излучения. Это устройство усиливает импульсы напряжения, осуществляет выделение импульсов определенной амплитуды и направляет их либо в измеритель скорости счета (аналоговый вывод), сигнал с которого подается на электронный самопишущий потенциометр, либо в устройство вывода цифровой информации на цифропечатающее устройство (ЦПУ), либо на ЭВМ.

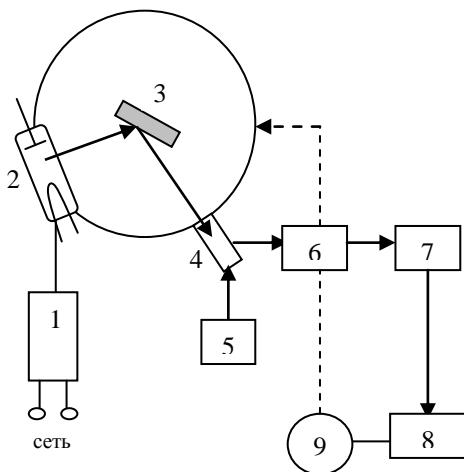


Рис. 3 – Блок – схема дифрактометра:

- 1 – высоковольтный источник питания,
- 2 – рентгеновская трубка, 3 – образец, 4 – счетчик,
- 5 – блок питания счетчика, 6 – усилитель импульсов,
- 7 – амплитудный дискриминатор,
- 8 – пересчетное устройство, 9 – ЭВМ.

Рентгеновский минидифрактометр МД–10

Минидифрактометр МД–10 – современный автоматизированный рентгеновский дифрактометр нового поколения, обеспечивающий неразрушающий метод рентгеноструктурного анализа поликристаллических веществ. Метод основан на явлении дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке порошкообразных кристаллических веществ (метод порошка или Дебая – Шеррера).

В минидифрактометре МД–10 используется трехлучевая рентгенооптическая схема, приведенная на рис. 4. В сочетании с позиционно-чувствительным детектором рентгеновского излучения (ПЧД) она полностью заменяет гониометрическое (угломерное) устройство классических дифрактометров, в которых счетчик – детектор вращается при съемке дифрактограммы (рис. 3).

В данном приборе исследования проводятся при фиксированных (неподвижных) положениях источника излучения (рентгеновской трубы) и детектора (ПЧД) в монохроматическом излучении. Регистрация дифракционной картины осуществляется в двух перекрывающихся угловых диапазонах. Первый рабочий диапазон соответствует углам 2θ от 16° до 70° , второй рабочий диапазон простирается от 65° до 120° .

В первом случае узкий пучок непрерывного (разных длин волн) рентгеновского излучения падает на кристалл-монохроматор M1, который выделяет монохроматическое излучение, соответствующее материалу анода рентгеновской трубы. Это излучение попадает на изучаемый поликристаллический образец, которое вследствие дифракции на беспорядочно ориентированных кристаллитах отражается (рассеивается) от образца под разными углами, образуя на поверхности детектора (ПЧД) дифракционную картину. Ход

рентгеновских лучей в этом случае показан на рис. 4 нижней, жирной, ломаной линией. На поверхности детектора ПЧД одновременно возникает дифракционная картина, которая соответствует углам 2θ в диапазоне от 16° до 70° и образована за счет отражений от атомных плоскостей различных кристаллических фаз, входящих в состав образца. Этот случай соответствует первому рабочему диапазону дифрактометра.

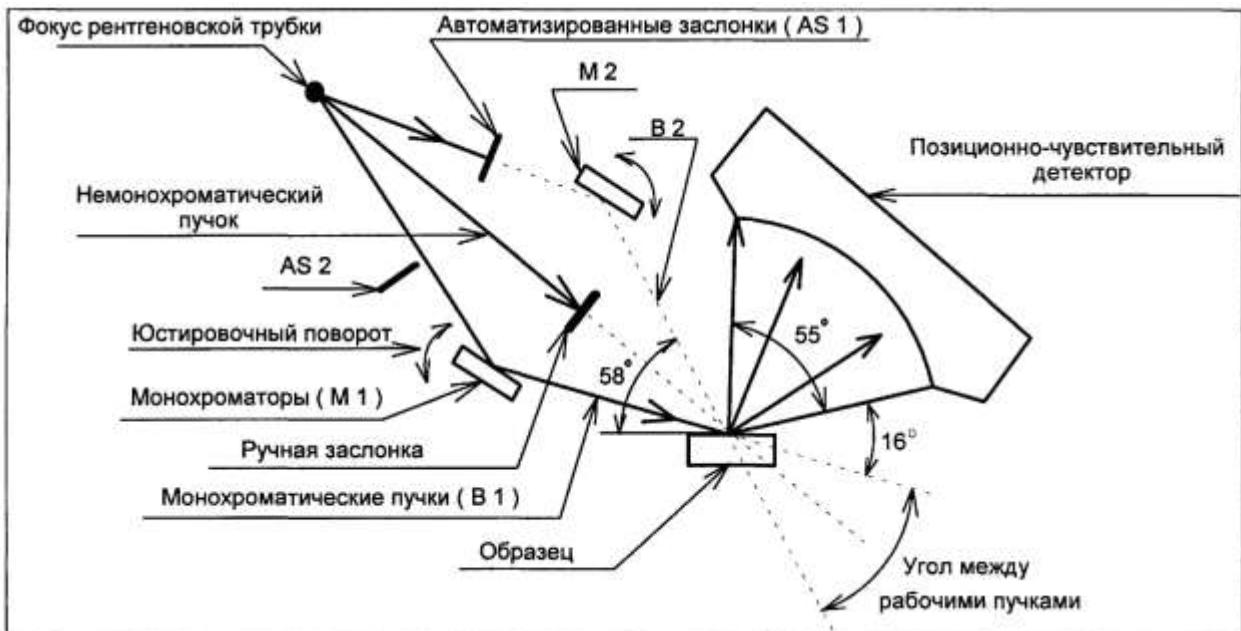


Рис. 4 - Рентгенооптическая схема минидифрактометра МД – 10 ЭФА

Второй рабочий диапазон, соответствующий интервалу углов по 2θ от 65° до 120° , реализуется при ином ходе (пути) рентгеновского излучения. В этом случае при открытой заслонке AS1 (и закрытых других) излучение от фокуса трубы поступает на кристалл – монокроматор M2, а затем падает на изучаемый образец (рис. 4, пунктирная линия). За счет иной геометрии хода рентгеновского пучка на поверхности детектора ПЧД формируется дифракционная картина, соответствующая второму рабочему диапазону прибора.

Электрические импульсы, возникающие в детекторе (ПЧД) при поглощении рентгеновского излучения, несут информацию о координате (месте) поглощения рентгеновского излучения и его интенсивности. После преобразования с помощью аналого – цифрового преобразователя импульсы поступают в ЭВМ, где происходит их накопление, сохранение и математическая обработка.

Сведения о дифракционной картине, получаемой с помощью дифрактометра имеют вид зависимости интенсивности рентгеновского излучения от удвоенного угла дифракции 2θ , как это показано на рис. 5 для корунда. Подобный график называется дифрактограммой или рентгенодифракционным спектром.

Данные о дифракционных углах и интенсивности дифракционных пиков позволяют определить параметры и тип кристаллической решетки изучаемого вещества, а также определить его фазовый состав. Качественный фазовый анализ состава проводится с использованием международной базы кристаллографических данных ICDD и программного обеспечения LookPDF. Возможно использование других источников кристаллографических данных, например, рентгенометрического определителя Михеева и др.

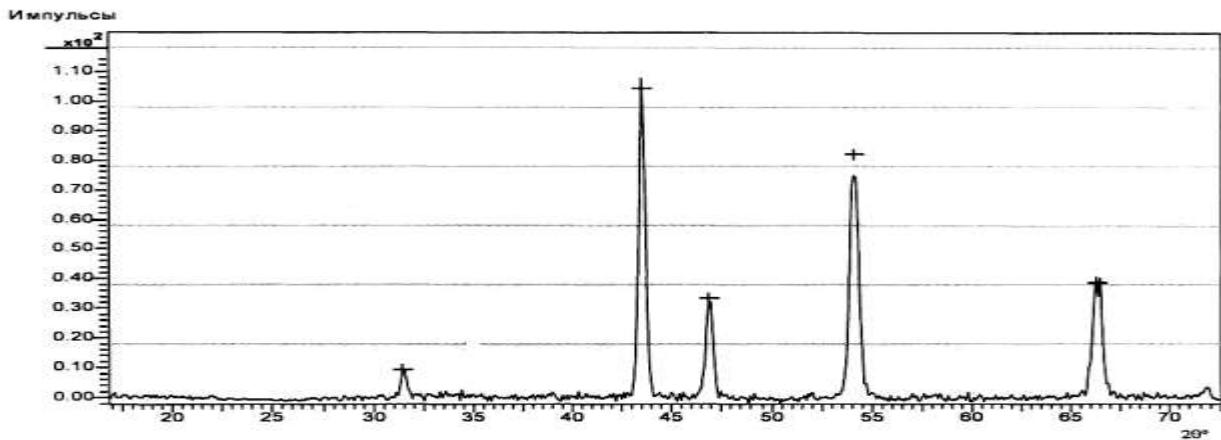


Рис. 5 – Дифрактограмма корунда. По горизонтали – угол 2θ , по вертикали – интенсивность дифракционных линий.

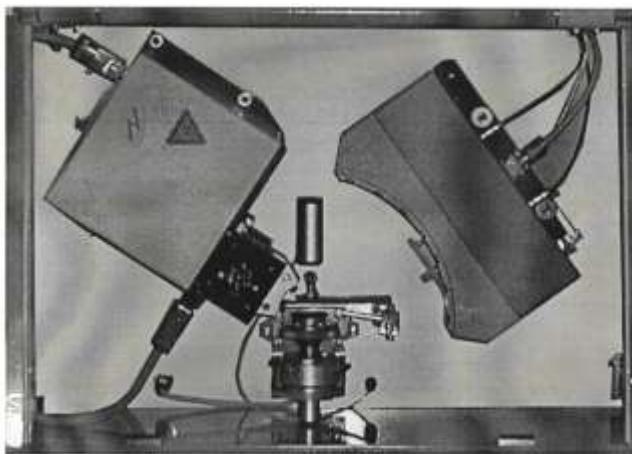


Рис. 6 – Общий вид приборной секции (фотография) минидифрактометра МД–10

На рис. 6 показан общий вид приборной секции (фотография), содержащей элементы рентгенооптической схемы прибора, скомпонованные в виде отдельных блоков.

Слева находится моноблок, содержащий рентгеновскую трубку, кристаллы-монохроматоры и электромагнитные заслонки рентгеновских пучков. Посередине расположен держатель кюветы для порошкообразных образцов, под которым находится устройство для его вращения. Над держателем образцов, сверху, видна цилиндрическая видеокамера.

С правой стороны находится позиционно – чувствительный детектор рентгеновского излучения. Видно, что он имеет изогнутую поверхность, на которой и формируется дифракционная картина. Угол охвата входного окна детектора равен 55° .

Управление минидифрактометром и сбор информации осуществляется с помощью IBM – совместимого компьютера под операционной системой Windows XP. Программно-вычислительный комплекс позволяет полностью управлять аппаратом и контролировать его в процессе измерений, а также проводить калибровку прибора (рентгеновского детектора) и осуществлять первичную обработку результатов измерений.

Область применения минидифрактометра МД–10

Минидифрактометр МД–10 предназначен для рентгеноструктурного анализа поликристаллических образцов: порошков, фрагментов горных пород или изделий из металлов, керамики и других материалов.

Минидифрактометр может применяться в исследовательских лабораториях для изучения новых материалов или для исследования последствий внешних воздействий на материалы, приводящих к их структурным или фазовым превращениям;

В экспертных криминалистических, экологических, судебно-медицинских и пожарно – технических лабораториях для идентификации фазового состава вещественных доказательств;

В заводских лабораториях машиностроительных, химических, аграрных и других промышленных предприятий для контроля технологических процессов, качественного и количественного состава готовой продукции или производства различных материалов;

В учебных целях при подготовке специалистов в области прикладного рентгеноструктурного анализа.

Подготовка образцов. Подготовка образца сводится к приготовлению мелкодисперсного порошка поликристаллического вещества зернистостью не более 0,2 мм (например измельчение с помощью пестика и ступки или специальной мельницы) и его размещение в кювете (из комплекта дифрактометра). При измельчении образца необходимо исключить попадание в измельчаемое вещество посторонних материалов, в том числе и микрочастиц от материала ступки или мельницы, которые могли бы дать собственный дифракционный спектр и исказить информацию о фазовом составе исследуемого вещества. Порошок в кювете должен быть уплотнен с помощью, например, стеклянной пластины. Поверхность уплотненного порошка должна быть плоской и совпадать с краями кюветы.

Контрольные вопросы

1. Что называется рентгеновским излучением?
2. Механизм генерации рентгеновского излучения. Устройство, назначение и классификация рентгеновских трубок. Из какого материала изготавливают катод и анод рентгеновских трубок для структурного анализа?
3. Какое физическое явление используется для изучения кристаллической структуры веществ с помощью рентгеновского излучения? Условие Вульфа – Брэгга.
4. Устройство и применение рентгеновского минидифрактометра МД-10.
5. Тип и назначение рентгеновского детектора, применяемого в минидифрактометре.
6. Методика подготовки образцов изучаемого вещества для съёмки дифрактограммы.

1.8 Лабораторная работа № ЛР-8 (2 часа)

Тема: «Идентификация вещества по данным о межплоскостных расстояниях»

1.8.1 Цель работы: освоить технику анализа дифрактограммы поликристаллического вещества для определения фазового состава.

1.8.2 Задачи работы:

1. По дифрактограмме однофазного поликристаллического вещества определить углы θ и межплоскостные расстояния d_{hkl} .
2. С помощью табличных данных о межплоскостных расстояниях установить (идентифицировать), вещество, с которого была снята дифрактограмма.

1.8.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Дифрактограмма однофазного поликристаллического вещества.
2. Линейка измерительная

1.8.4 Описание (ход) работы:

1. Изучить теоретическое введение.

Каждая фаза обладает своей кристаллической решеткой. Семейства атомных плоскостей, образующих эту решетку, обладают своим, характерным только для данной решетки набором значений межплоскостных расстояний d_{hkl} . Здесь (hkl) – индексы Миллера данного семейства атомных (параллельных) плоскостей. Поэтому каждая кристаллическая фаза всегда создаёт свой одинаковый дифракционный спектр (дифрактограмму), характеризующийся определённым набором межплоскостных расстояний $d_{(hkl)}$ и соответствующих интенсивностей дифракционных линий $I_{(hkl)}$, присущим только данной кристаллической фазе. Относительная интенсивность этих линий зависит прежде всего от структуры фазы.

Знание межплоскостных расстояний исследуемого объекта позволяет, таким образом, охарактеризовать его кристаллическую решетку и установить во многих случаях природу вещества или фазу.

Определение фазового состава поликристаллических веществ по их межплоскостным расстояниям является одной из наиболее распространенных и сравнительно легко решаемых задач рентгеноструктурного анализа. Важно, что эта задача может быть решена для любого поликристаллического вещества независимо от типа его кристаллической решетки, тогда как определение размеров и формы элементарной ячейки поликристаллического вещества возможно далеко не во всех случаях.

Основой расчёта межплоскостных расстояний в кристаллических материалах является дифракционное уравнение (или условие) Вульфа – Брэгга:

$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda$$

Из него следует, что

$$\frac{d_{hkl}}{n} = d_{HKL} = \frac{\lambda}{2 \sin\theta} \quad (1)$$

Здесь d_{hkl} – межплоскостные расстояния атомных плоскостей с индексами

Миллера (hkl) ;

n – целые числа $(1, 2, 3 \dots)$, так называемый порядок отражения.

Значения $\frac{d_{hkl}}{n} = d_{HKL}$ можно рассматривать как межплоскостные расстояния d_{HKL}

для фиктивных атомных плоскостей с индексами (HKL) , которые называются индексами интерференции и равны произведению соответствующих индексов атомных плоскостей (hkl) (индексов Миллера) на порядок отражения n ($H = nh$, $K = nk$, $L = nl$).

Длина волны рентгеновского характеристического излучения λ , которая входит в уравнение Вульфа – Брэгга, величина известная. Поэтому задача определения межплоскостных расстояний сводится к нахождению дифракционных углов θ для всех максимумов (дифракционных пиков или линий) на рентгеновском дифракционном спектре (дифрактограмме). Эти углы определяются по положению максимума, полагая, что он совпадает с центром тяжести дифракционной линии.

Данные о межплоскостных расстояниях $\frac{d_{hkl}}{n} = d_{HKL}$ для различных фаз можно найти в специальных таблицах, справочной литературе и в журнальных статьях. В этих таблицах данные о межплоскостных расстояниях расположены в порядке убывания значений $\frac{d_{hkl}}{n}$ [4 – 7].

Определив из экспериментальной дифрактограммы набор межплоскостных расстояний d_{HKL} для исследуемого материала и сопоставив его с известными (из таблиц) заранее данными d_{HKL} для чистых веществ или их различных соединений, можно установить, какую фазу представляет собой данный материал.

2. Выполнить задания:

- По дифрактограмме однофазного поликристаллического вещества определить углы θ и межплоскостные расстояния d_{HKL} .
- С помощью табличных данных о межплоскостных расстояниях установить (идентифицировать), от какого вещества была снята дифрактограмма.

Воспользуйтесь одной из дифрактограмм, приведенных в приложении 1. Исходные данные, результаты измерений и расчета следует заносить в таблицу 1 единой формы и заполнять её последовательно по столбцам.

Столбец № 1. Заносят порядковый номер дифракционных линий. Нумерацию линий на дифрактограмме проводят в порядке возрастания углов θ от малых углов к большим.

Столбец № 2. В этом столбце отношение $\frac{I}{I_0}$ (в %) есть интенсивность каждой линии на

дифрактограмме относительно интенсивности самой сильной линии. Для качественной оценки интенсивности можно воспользоваться максимальными значениями интенсивности, то есть охарактеризовать интенсивность высотой пика, измеренной в мм.

Столбец № 3. $2\theta_{omc}$ – угол, соответствующий дифракционному максимуму на экспериментальной дифрактограмме.

Столбец № 4. Значения углов дифракции $\theta = 2\theta_{omc}/2$.

Столбец № 5. Значения $\sin\theta$ должны быть записаны с точностью до четвертого знака после запятой.

Столбец № 6. По формуле (1) определяют значения d_{HKL} (в нм) для линий экспериментальной дифрактограммы. Обычно значения d_{HKL} определяют с точностью $\pm 0,001$ нм при $\theta < 60^\circ$ и $\pm 0,0001$ нм при $\theta > 60^\circ$.

Столбец № 7. С помощью таблиц приложения 2, сравнивая межплоскостные расстояния d_{HKL} , полученные из экспериментальной дифрактограммы, с табличными значениями d_{HKL} , определить вещество, для которого табличные значения d_{HKL} совпадают с расчетными (экспериментальными).

При сравнении экспериментальных значений d_{HKL} с табличными необходимо учитывать, что табличные значения даны, как правило, для фаз высокой чистоты. Поэтому при наличии растворенных примесей в исследуемой фазе ее значения d_{HKL} могут несколько отличаться от табличных (в пределах $\pm 0,005 \dots 0,001$ нм).

Для сравнения в столбец 7 записывают значения межплоскостных расстояний, взятых из таблицы для предполагаемого вещества.

Столбец № 8. В этот столбец заносятся табличные значения интенсивности линий идентифицируемой фазы. Поскольку интенсивность линий зависит от геометрии съемки и длины волны используемого излучения, возможно расхождение между табличными и экспериментальными значениями относительных интенсивностей.

Таблица 1 – Расчет дифрактограммы для определения межплоскостных расстояний и идентификации веществ

Исходные данные Излучение: $\lambda =$

Номер линии по порядку	$\frac{I}{I_0}, \%$	$2\theta_{omc}$	θ	$\sin\theta$	d_{HKL}	Табличные значения	
						d_{HKL}	I_{HKL}
1	2	3	4	5	6	7	8

--	--	--	--	--	--	--

3. Написать отчёт о выполненной работе.

В отчёте должны быть приведены:

- краткое описание методики определения межплоскостных расстояний;
- дифракционное уравнение Вульфа – Брэгга;
- дифрактограмма образца, который нужно идентифицировать;
- таблица 1 с результатами расчёта дифрактограммы;
- заключение фазовом составе образца.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое фаза вещества?
2. Методика определения фазового состава поликристаллических веществ по их межплоскостным расстояниям. Уравнение Вульфа-Брэгга.
3. Чем определяется число линий на дифрактограмме?
4. Что называют индексами интерференции?
5. Наиболее полные литературные источники межплоскостных расстояний.
6. Методика расчета дифрактограмм для определения межплоскостных расстояний и идентификации исследуемого вещества.

1.9 Лабораторная работа № ЛР-9 (2 часа)

Тема: «Изучение электронного осциллографа»

1.9.1 Цель работы: Ознакомление с устройством и работой электронного осциллографа.

1.9.2 Задачи работы:

1. Изучение устройства (блок-схемы) базовой модели электронного осциллографа.
2. Изучить устройство, принцип действия и назначение электронно-лучевой трубки.
3. Изучить работу и функциональное назначение основных узлов (усилители вертикального и горизонтального отклонения, генератор горизонтальной развёртки, схема синхронизации) электронного осциллографа.

1.9.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Электронно-лучевая трубка.
2. Электронный осциллограф С1-112м.
3. Источник постоянного напряжения.
4. Источник переменного напряжения или звуковой генератор .

1.9.4 Описание (ход) работы:

Занятие 1.

Теоретическое введение

Электронный осциллограф – это универсальный измерительный прибор, предназначенный для визуального наблюдения и исследования быстропеременных периодических электрических процессов (сигналов).

В нём используется отклонение электронного луча для получения на экране видимого изображения мгновенных значений функциональных зависимостей переменных величин, одной из которых обычно является время. Это изображение электрического сигнала называется осциллографом.

С помощью осциллографа можно измерить силу тока и напряжение, изучать зависимость силы тока и напряжения от времени, измерять сдвиг фаз между ними, измерять частоту и амплитуду различных переменных напряжений. Кроме того, при применении соответствующих преобразователей осциллограф позволяет исследовать неэлектрические процессы, например измерять малые промежутки времени, кратковременные давления и другие.

Достоинством осциллографа является его высокая чувствительность и практическая безынерционность действия, что позволяет исследовать процессы, наименьшая длительность которых составляет 10^{-10} с.

Устройство осциллографа. Электронный осциллограф – сложный радиотехнический прибор и состоит из следующих функциональных блоков, показанных на структурной схеме (блок-схеме) базового осциллографа (рис.1):

- электронно-лучевой трубки (ЭЛТ);
- входного делителя напряжений (аттенюатора);
- усилителя вертикального отклонения электронного луча;
- схемы синхронизации и запуска генератора развёртки;
- генератора развёртки (ГР);
- усилителя горизонтального отклонения электронного луча;
- блок питания, включающий низковольтный и высоковольтный выпрямители (на схеме не показан).

Как видно из схемы на рис.1 основные электрические схемы (блоки) образуют так называемые каналы «Y» и «X».

Канал вертикального отклонения электронного луча «Y» содержит входное устройство (аттенюатор), предварительный усилитель У, линию задержки сигнала, оконечный усилитель.

Канал горизонтального отклонения электронного луча «X» содержит генератор развёртки по оси X, устройство синхронизации, предварительный и оконечный усилители по оси X.

Все эти блоки находятся внутри корпуса осциллографа, на переднюю панель которого выведены экран электронно-лучевой трубы, тумблер включения и выключения питания, различные переключатели, ручки управления и зажимы или гнёзда для подачи на осциллограф исследуемых напряжений. Питание прибора осуществляется обычно от сети переменного тока или/и электрической батареи. Внешний вид осциллографа С1-1 показан на рис.2. Современные осциллографы как правило имеют значительно больше блоков и узлов, чем это представлено на базовой схеме, и соответственно обладают большими возможностями.

Рассмотрим устройство и принцип работы отдельных частей базового осциллографа.

1. Электронно-лучевая трубка представляет собой электронно-вакуумный прибор, относящийся к группе электронно-лучевых приборов (рис.3) и предназначена для визуального наблюдения исследуемых электрических сигналов. Она преобразует электрический сигнал в видимое изображение. Основными элементами ЭЛТ являются: стеклянная конусообразная колба, электронная пушка и отклоняющая система.

Внешне она представляет собой стеклянную колбу специальной вытянутой формы. Внутри колбы создан высокий вакуум. В колбе помещается подогреватель 1(нить накала) катода, сам катод, управляющий электрод или модулятор 3, первый анод (фокусирующий) 4, второй анод (ускоряющий) 3, вертикально отклоняющие пластины 6,

горизонтально отклоняющие пластины 7, экран 8, покрытый с внутренней стороны слоем люминофора, то есть флюоресцирующим веществом, которое светится при ударе о него быстродвижущегося электрона.



Рис.1 – Структурная схема осциллографа (базовая модель)



Рис.2 – Внешний вид осциллографа С1-1

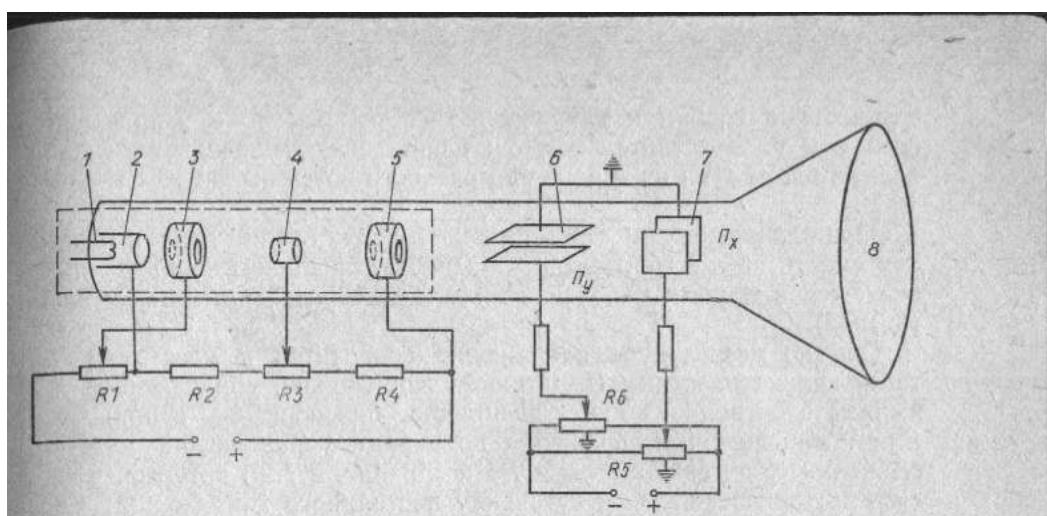


Рис.3 – Схема электронно-лучевой трубы

Нить накала (подогреватель), катод, управляющий электрод и оба анода образуют электронную пушку или электронный прожектор, назначение которого – получить сфокусированный поток электронов, называемый электронным лучом. Источником электронов является накаливаемый катод. Для формирования электронного луча из испущенных катодом электронов служат три электрода, имеющих форму коаксиальных цилиндров: управляющий электрод, первый анод и второй анод. Подача на эти электроды определённых электрических потенциалов (напряжений) приводит к образованию из испущенных электронов остросфокусированного потока быстродвижущихся (ускоренных) электронов, которые, ударяясь об экран, создают на нём маленькое ярко светящееся пятно. На пути электронного луча находятся две пары пластинчатых электродов P_x и P_y , которые образуют отклоняющую систему, служащую для перемещения электронного луча в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Электронная пушка получает питание от высоковольтного выпрямителя, обеспечивающего разность потенциалов между катодом и вторым анодом от 1 до 5 кВ в зависимости от типа трубы. Это напряжение подаётся на ряд последовательно соединённых резисторов (потенциометров) $R1, R2, R3, R4$ (рис.3). Таким образом обеспечивается возможность регулирования потенциалов отдельных частей пушки, что позволяет регулировать вид (яркость и чёткость) изображения на экране.

Яркость. Подавая на управляющий электрод (модулятор) 3 отрицательный потенциал относительно катода, можно регулировать число электронов, выходящих из электронной пушки и ударяющихся об экран, заставляя его светиться (рис.3). То есть можно с помощью потенциометра $R1$ изменять яркость свечения экрана. Поэтому ручка движка потенциометра $R1$, выведенная на переднюю панель, обозначена «Яркость».

Фокус. Кроме того, совместно с первым анодом 4 управляющий электрод образует электростатическую линзу, собирающую электроны в пучок. Поток электронов, проходя внутри первого анода, сжимается, а затем окончательно фокусируется второй электростатической линзой, образованной полем между первым и вторым анодами. Изменяя потенциал первого анода с помощью потенциометра $R3$, можно осуществлять фокусировку электронного потока. Движок потенциометра $R3$ выведен на переднюю панель и обозначен «Фокус».

В результате такой фокусировки из электронной пушки выходит остросфокусированный поток электронов, называемый электронным лучом. Выйдя из второго анода, электронный луч проходит между двумя парами отклоняющих пластин и, попадая флюоресцирующий экран, вызывает его свечение. Фокусировка определяет чёткость изображения на экране.

Отклоняющая система предназначена для перемещения электронного луча в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В электронных осциллографах обычно применяется электростатическое отклонение луча. Такая отклоняющая система состоит из двух пар металлических пластин, расположенных симметрично относительно оси трубы. Пластины одной пары расположены перпендикулярно пластинам другой пары.

Первая пара пластин расположена горизонтально и отклоняет электронный луч в вертикальном направлении и поэтому называются **вертикально-отклоняющими P_y** (рис.3, 6). На эти пластины подаётся исследуемое напряжение, усиленное усилителем вертикального отклонения (усилителем Y).

Вторая пара пластин расположена вертикально и отклоняет луч в горизонтальном направлении. Эти пластины называются **горизонтально-отклоняющими P_x** (рис.3, 7). На эти пластины подаётся пилообразное напряжение с генератора развёртки, которое управляет движением луча по горизонтали.

В отсутствие разности потенциалов между отклоняющими пластинами электронный луч попадает в центр экрана. При приложении к пластинам разности потенциалов между ними возникает электрическое поле, которое, действуя на пролетающие в нём электроны, отклоняет их от первоначального направления в сторону пластины с большим потенциалом. Отклонение луча зависит от величины и знака разности потенциалов, приложенной к пластинам. Смещение луча на экране пропорционально разности потенциалов между пластинами, то есть

$$x = \alpha_x U_x \quad (1)$$

$$y = \alpha_y U_y \quad (2)$$

где x, y - смещения луча в горизонтальном и вертикальном направлениях, U_x, U_y - разности потенциалов между горизонтально и вертикально отклоняющими пластинами. Коэффициенты пропорциональности α_x и α_y называются чувствительностью трубы к напряжению соответственно в направлениях осей x и y . Чувствительность определяет смещение электронного луча на экране при разности потенциалов на пластинах 1 В и имеет небольшое значение, менее 1 мм.

При одновременном действии полей между обеими парами отклоняющих пластин электронный луч сместится и в горизонтальном и в вертикальном направлениях и окажется в точке с координатами x и y , определяемыми формулами (1) и (2).

Перемещение луча по экрану. Для перемещения изображения по экрану отклоняющие пластины соединены с потенциометрами $R5$ и $R6$, которые подсоединенны к источнику постоянного напряжения (рис.3). Середина каждого из потенциометров $R5$ и $R6$ заземлена. Если движок потенциометра $R5$ стоит на середине, то между пластинами ΔU разность потенциалов равна нулю, так как противоположная плата заземлена всегда. При перемещении движка потенциометра $R5$ вправо от середины, то есть к «плюсу» источника тока, потенциал пластины P_x будет увеличиваться, что приведёт к перемещению луча на экране влево от наблюдателя. При перемещении движка влево (ближе к «минусу») луч будет смещаться вправо на экране. Ручка потенциометра $R5$ также выведена на переднюю панель и обозначена «ось х влево – вправо». Аналогично работает потенциометр $R6$, с помощью которого луч перемещается по вертикали. Поэтому его ручка снабжена надписью «ось у вверх - вниз».

2. Блок схема осциллографа. Непосредственно на отклоняющие пластины P_x и P_y исследуемое напряжение подаётся сравнительно редко. Для этой цели в задней стенке корпуса или сбоку имеются специальные гнёзда.

Обычно исследуемое напряжение подаётся на входные зажимы или гнёзда, расположенные в нижней части передней панели осциллографа. Левый «Вход» - вход Y , а правый «Вход» - это вход X . Так как одна из каждой пары отклоняющих пластин заземлена (соединенна с корпусом прибора), исследуемое напряжение U_y должно подводиться к левой клемме «Вход» и корпусу, а напряжение U_x - к правой клемме «Вход» и также к корпусу. Для удобства рядом установлены клеммы «Земля», которые закорочены между собой корпусом осциллографа и в случае сильных помех заземляются.

Аттенюатор или делитель напряжения. С входных клемм напряжение U_y подаётся на делитель напряжения, состоящий из нескольких резисторов $R1, R2, R3$ (рис.4). С помощью этого делителя и переключателя P_1 на потенциометр $R4$ подаются напряжения, равные: $U_y, 0,1 U_y, 0,01 U_x, 0,001 U_x$, то есть осуществляется ступенчатое изменение напряжения. Переключатель P_1 имеет на передней панели ручку, обозначенную «Ослабление». Перемещая движок потенциометра $R4$ (рис.4) можно плавно изменять напряжение, подаваемое на усилитель вертикального отклонения Y , а следовательно, и на пластину P_y . Ручка потенциометра $R4$ на передней панели снабжена надписью «Усиление плавно». Аналогичный потенциометр $R5$ и усилитель горизонтального отклонения X находятся перед пластиной P_x .

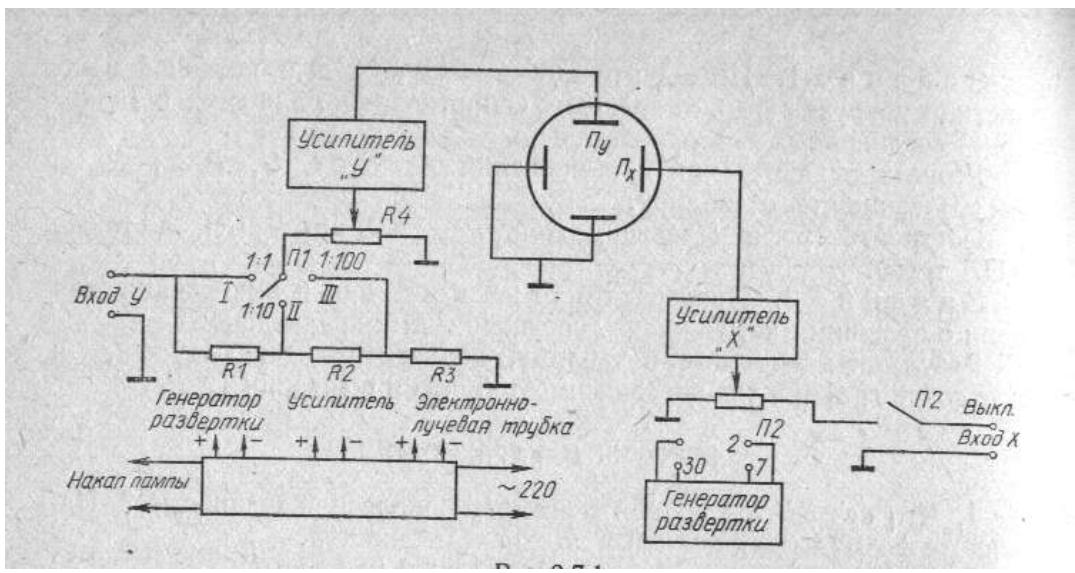


Рис.4 - Упрощённая блок схема осциллографа С1-1

Усилитель вертикального отклонения усиливает слабые исследуемые электрические сигналы до напряжений, которые вызывают заметные смещения луча на экране, что позволяет наблюдать исследуемые сигналы.

Канал горизонтального отклонения (канал развертки «Х») состоит из генератора развертки, усилителя горизонтального отклонения и блока синхронизации.

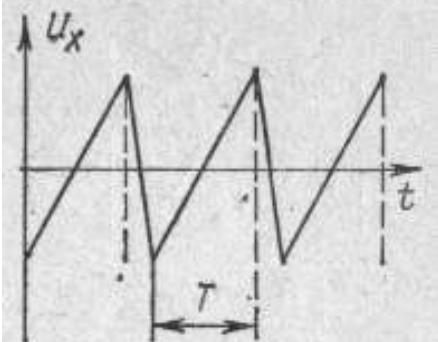


Рис.5 – График зависимости напряжения U_x от времени

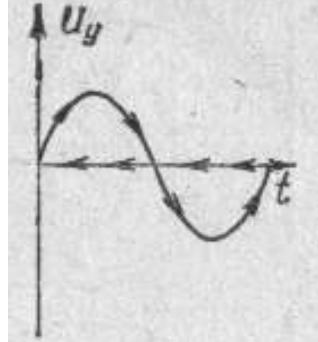


Рис.6 – Осциллограмма синусоидального сигнала генератора развертки

Генератор развертки предназначен для формирования пилообразного напряжения, которое подается на пластины Π_x для перемещения электронного луча по горизонтали. График импульсов напряжения пилообразной формы показан на рис.5. Напряжение в течение промежутка T линейно увеличивается, а затем почти мгновенно падает до первоначального значения. Частоту напряжения, вырабатываемого генератором развертки, можно ступенчато и плавно изменять в достаточно широких пределах (как правило от 10 Гц до 1 МГц и более). Движение (прямой ход) электронного луча по экрану происходит слева направо, быстрый обратный ход – в противоположном.

Усилитель горизонтального отклонения предназначен для усиления пилообразного напряжения, поступающего на его выход с генератора развертки. С выхода усилителя усиленное пилообразное напряжение поступает на горизонтально отклоняющие пластины Π_x для перемещения луча в горизонтальной плоскости.

Подадим такое пилообразное напряжение на пластину Π_x и проследим за движением луча на экране. Поскольку напряжение U_x пропорционально времени t в течение

промежутка времени T , смещение x тоже пропорционально времени, то есть луч движется по экрану равномерно слева направо. Это движение луча называется **прямой ход луча**. Когда напряжение быстро падает до начального, луч быстро возвращается в исходную точку (**обратный ход**). Обратный ход луч происходит настолько быстро, что его след на экране почти незаметен. Однако во многих современных осциллографах при обратном ходе луч гасится. Для этого на управляющий электрод электронной пушки подаётся отрицательное запирающее напряжение, не позволяющее электронам вылетать из электронной пушки.

С помощью переключателя на передней панели «Диапазон частот» и ручки «Частота» можно менять частоту (период) пилообразного напряжения, выдаваемого генератором развёртки. При частотах до 10 Гц заметно перемещение луча на экране в виде движущегося меленького светящегося пятнышка или точки. При больших частотах след луча из-за инерционности человеческого зрения сливается в сплошную линию.

Во многих современных осциллографах регулировка частоты развёртки выведена на панель в виде удобной двойной ручки с надписью «Развёртка». При этом под ней указывается не частота, а интервал времени, соответствующий одному делению шкалы осциллографа, «время/дел».

Фиксирование временных процессов на экране осциллографа. Как образуется на экране изображение зависимости электрического сигнала (напряжения) от времени, которое называется осциллограммой ?

Одновременно с напряжением развёртки , поданным на пластину Π_x , подадим на вход У периодически меняющееся напряжение U_y с периодом T , равным периоду развёртки. При этом луч будет участвовать в двух взаимно перпендикулярных движениях и вычерчивать на экране траекторию этого движения. Пусть U_y изменяется со временем синусоидально, то есть $U_y = U_m \sin(2\pi \frac{t}{T})$.

Тогда луч будет колебаться в вертикальном направлении и при этом равномерно перемещаться в горизонтальном направлении слева направо. Очевидно, что траектория луча будет представлять собой синусоиду (рис.6). По окончании периода T луч быстро вернётся в крайнее левое положение (обратный ход) и снова начнёт вычерчивать на экране синусоиду. Если периоды развёртки и исследуемого напряжения (в примере синусоидального) равны, то следующая синусоида точно совпадёт с первой, и на экране – при частоте исследуемого сигнала больше 16 Гц – будет видна неподвижная светящаяся линия (в данном примере синусоида).

Как выглядит осциллограмма исследуемого сигнала при изменении частоты развёртки? На рис.7 (слева) изображён график $U_y(t)$, а на него наложен график пилообразного напряжения, который делит ось времени на промежутки $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = T_{разв.}$, в течение которых происходит полная развёртка. Луч на экране при каждой развёртке вычерчивает ту часть синусоиды, в течение которой происходит развёртка. При равенстве периодов $T_{иссл.} = T_{разв.}$ Кривые I, II, III одинаковы и при наложении друг на друга совпадают и на экране наблюдается осциллограмма одного колебания (рис.7, справа).

Если уменьшить частоту развёртки вдвое, то есть увеличить период развёртки в два раза, то за увеличенное время развёртки луч успеет совершить два полных колебания в вертикальном направлении, и на экране будет видна картина, изображённая на рис.8. Эта

осциллограмма изображает два полных колебания (колебательного движения в вертикальном направлении) луча по поверхности экрана.

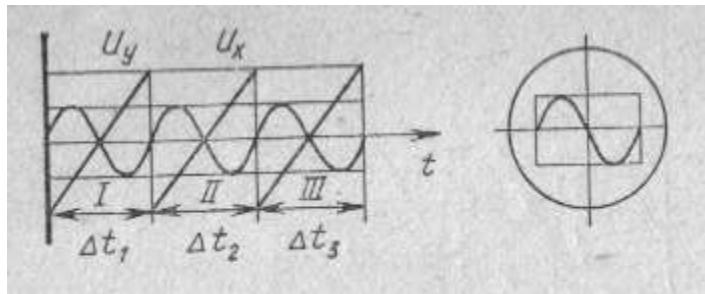


Рис.7

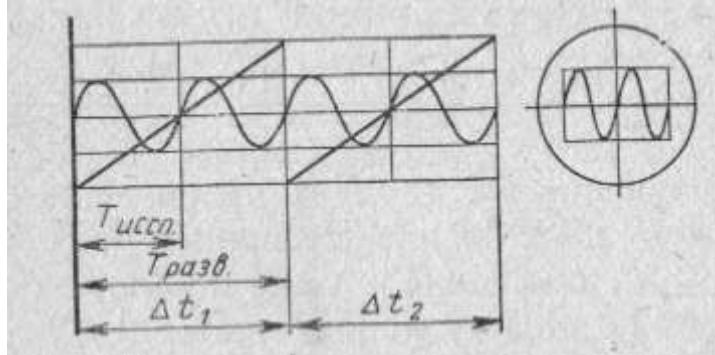


Рис.8

Если $U_y(t)$ изменяется по другому закону, но является периодической функцией, то на экране будет наблюдаться соответственно график этого напряжения, что и используется при исследовании различных процессов.

Однако, если период развёртки T_x не является целым кратным периоду T_y изучаемого напряжения, то электронный луч будет начинать движение слева направо каждый раз в различных фазах (положениях, состояниях) и получаемая на экране картина будет представлять собой наложение нескольких смешённых траекторий. Разобраться в такой картине (осциллограмме) практически невозможно и приходится изменять период развёртки до тех пор, пока он не станет согласованным с периодом изучаемого напряжения ($T_x = n T_y$).

Устойчивая картина на экране осциллографа (осциллограмма) наблюдается при совпадении частоты исследуемого напряжение и частоты развёртки или в более общем случае тогда, когда периоды $T_{разв.}$ и $T_{иссл.}$ кратны друг другу

$$T_{разв.} = n T_{иссл.}, \quad \text{где } n - \text{целое число.}$$

Исследовать можно и одиночные электрические импульсы, но при этом применяется более сложная техника (осциллографы).

Схема (блок) синхронизации предназначен для получения неподвижного изображения на экране электронно-лучевой трубки. Блок синхронизации осуществляет запуск генератора развертки, который вырабатывает пилообразное напряжение.

Принцип синхронизации состоит в следующем. Допустим, что нам удалось с помощью ручки «Частота плавно» подобрать частоту развёртки (частоту генератора), кратную частоте исследуемого сигнала. Однако, вследствие нестабильности частоты генератора развёртки через некоторое время это условие не будет полностью соблюдаться

и изображения на экране не будут накладываться друг на друга. При этом картина (осциллограмма) будет перемещаться по экрану, что затрудняет наблюдение.

Для получения устойчивого изображения важно, чтобы начало развёртки всегда совпадало с одной и тоже фазой исследуемого сигнала, то есть чтобы развёртка начиналась одновременно с прохождением исследуемого напряжения, например, через нулевое значение. Тогда начальные точки графика будут накладываться друг на друга. В силу периодичности сигнала совпадут и все остальные точки изображения. В этом случае говорят, что развёртка синхронизирована (согласована во времени) с исследуемым сигналом.

Синхронизация – это процесс, при котором работа генератора развёртки становится зависимой (связанной) от исследуемого сигнала. Синхронизацию осуществляют с помощью схемы синхронизации. **Режим синхронизации может быть внутренним и внешним.**

При работе осциллографа в режиме внутренней синхронизации из канала вертикального отклонения снимается часть усиленного исследуемого сигнала и подаётся на вход схемы синхронизации. Эта схема совместно со схемой запуска генератора развёртки вырабатывает короткие импульсы определённой формы, полярности и амплитуды, которые осуществляют запуск генератора развёртки. Формирование запускающих импульсов происходит в тот момент, когда напряжение на входе блока синхронизации достигает определённой величины, которая выбирается регулятором «уровень синхронизации».

При работе в режиме внешней синхронизации сигнал, управляющий запуском генератора развёртки, подаётся извне, то есть отдельного внешнего источника.

Требуемый режим работы блока синхронизации задаётся переключателем рода работы (внутренняя, внешняя) и переключателем режима синхронизации. Фиксированные положения переключателя отмечены надписями:

- а) «внутрь» - при этом напряжение синхронизации подаётся от части исследуемого сигнала;
- б) «от сети» - при этом напряжение синхронизации подаётся от переменного напряжения частотой 50 Гц;
- в) «внешн» - при этом напряжение синхронизации должно быть подано от внешнего источника через гнездо «вход синхронизации».

Плавное изменение величины синхронизирующего напряжения осуществляется потенциометром, у ручки которого имеется надпись «уровень синхронизации» или «усиление».

Задание 1. Изучение устройства и работы электронно-лучевой трубы.

Нарисуйте схему устройства электронно-лучевой трубы, укажите названия и назначение её основных частей.

Задание 2. Изучение назначения и принципа работы отдельных блоков осциллографа: аттенюатора, усилителя канала вертикального отклонения, канала развёртки; разделов «Фиксирование временных процессов», «Принцип синхронизации».

Задание 3. Определение чувствительности электронно-лучевой трубы.

Смещение луча на экране пропорционально разности потенциалов между отклоняющими пластинами, то есть $x = \alpha_x U_x$ и $y = \alpha_y U_y$, где x, y - смещения луча в горизонтальном и вертикальном направлениях, U_x, U_y - разности потенциалов пластинами. Коэффициенты α_x и α_y называются чувствительностью трубы к напряжению соответственно в вертикальном и горизонтальном направлениях. Чувствительность определяет смещение электронного луча на экране при разности потенциалов на пластинах 1 В и имеет небольшое значение. Выполнение:

- включите осциллограф и через несколько минут установите посередине экрана луч;

- подайте постоянное напряжение $U_y = 100$ В непосредственно на вертикально отклоняющие пластины «У» осциллографа, то есть к гнёздам «У» на задней панели. При этом тумблер – переключатель должен находиться в положении «У»;
- измерьте смещение электронного луча y на экране и определите коэффициент чувствительности α_y ;
- затем, подайте постоянное напряжение $U_x = 100$ В непосредственно на горизонтально отклоняющие пластины «Х» осциллографа, то есть к гнёздам «Х» на задней панели. При этом тумблер – переключатель должен находиться в положении «Х»;
- Измерьте смещение электронного луча x на экране и определите коэффициент чувствительности α_x ;
- Результаты измерений занесите в лабораторную тетрадь и сделайте выводы.

1.10 Лабораторная работа № ЛР-10 (2 часа)

Тема: «Изучение электронного осциллографа

1.10.1 Цель работы: Ознакомление с устройством и работой электронного осциллографа.

1.10.2 Задачи работы:

1. Ознакомиться с элементами управления электронного осциллографа С1-112м.
2. Выполнить задания по изучению электрических сигналов с помощью осциллографа.

1.10.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Электронно-лучевая трубка.
2. Электронный осциллограф С1-112м.
3. Источник постоянного напряжения.
4. Источник переменного напряжения или звуковой генератор .

1.10.4 Описание (ход) работы:

Задание 1. Ознакомиться с правилами эксплуатации и работой электронного осциллографа С1-112 М.

Описание элементов управления на панели прибора, подготовка осциллографа и порядок проведения измерений указаны в тексте.

Задание 2. Подготовить осциллограф к проведению измерений согласно разделу «Подготовка осциллографа к проведению измерений».

Задание 3. Измерить величину постоянного напряжения низковольтной батареи (пункт 2 раздела «Проведение измерений»). Запишите измеренное значение в тетрадь.

Задание 4. Получение осцилограммы и измерение амплитуды переменного или пульсирующего напряжения.

Подключите вход «У» с помощью измерительного щупа к низковольтному источнику переменного или пульсирующего напряжения. **Вначале установите переключатель делителя напряжения в положение 1:10.** В дальнейшем возможно его переключение в положение 1:1, в котором входной сигнал не ослабляется.

Получите устойчивое изображение сигнала (осцилограмму), содержащее несколько периодов, нарисуйте изображение осцилограммы в тетради.

Определите амплитуду сигнала в соответствии с пунктом 1 раздела «Проведение измерений».

Задание 5. По осциллограмме определите период T и частоту f этого сигнала в соответствии с пунктами 3 и 4 раздела «Проведение измерений». Результаты измерений и расчёта запишите в тетрадь.

Сделайте выводы о проделанной работе.

Приложение.

Подготовка осциллографа к проведению измерений

1. Подключить осциллограф к сети.
2. Установить перед включением осциллографа в сеть органы управления в следующие положения:
 - ручки **яркость, фокус, смещение X, смещение Y, уровень** - в среднее положение;
 - плавные регулировки - в крайнее правое положение (калиброванное);
 - установить автоколебательный режим развёртки, нажав кнопку “**AUTO**” (авто).
3. Нажатием кнопки **СЕТЬ**, включить прибор. Прогреть прибор несколько минут.
4. Проверить работоспособность осциллографа путём выполнения следующий операций:
 - ручкой **яркость** добейтесь появления линии развёртки на экране;
 - ручками **яркость и фокус** добейтесь оптимальной яркости и фокусировки луча;
 - установите переключатель режима развёртки в положение “**NORM**” (ждущий), линия развёртки исчезнет. При подаче сигнала на вход осциллографа и вращении ручки “**LEVEL**” (Уровень) появится изображение сигнала;
 - ручкой **смещение Y** совместите горизонтальную линию луча (развёртку) с центральной горизонтальной линией шкалы экрана. Затем ручкой **смещение X** сместите начало линии развёртки в начало экрана;
 - установите переключатель аттенюатора “**VOLTS / DIV**” в положение “**0,1 V**”, переключатель развёртки “**TIME / DIV**” установите в положение “**1 ms**”. Подключите вход канала Y к выходу калибратора (CAL).

Наблюдайте на экране 10 периодов сигнала калибратора размахом 5 делений по вертикали. Изменение положения переключателя “**VOLTS / DIV**” должно приводить к изменению амплитуды сигнала.

- изменение положения переключателя развёртки “**TIME / DIV**” должно приводить к растяжению (сжатию) изображения сигнала калибратора в горизонтальном направлении. Вращение ручки “**Плавно**” должно приводить к плавному растяжению (сжатию) изображения сигнала по горизонтали.

Прибор готов для проведения измерений.

Проведение измерений

В зависимости от характера исследуемого сигнала используется открытый или закрытый вход прибора.

- открытый вход (на панели положение кнопки-переключателя “**DC**”) - для исследования сигналов, содержащих постоянную составляющую (постоянное напряжение);
- закрытый вход (на панели положение кнопки-переключателя “**AC**”) - для исследования сигналов, не содержащих низких частот, а также для отделения постоянной составляющей.

Синхронизация развёртки может производиться:

- исследуемым сигналом;
- внешним сигналом, подаваемым на гнездо X;
- устойчивость синхронизации развёртки осуществляется вращением ручки “**LEVEL**” (уровень).

Переключателем (кнопка \pm на правой части панели) осуществляется выбор вида запуска развёртки от нарастающего или спадающего участка сигнала.

1. Измерение амплитуды исследуемого сигнала:

- ручками “Смещение X, Y” выведите изображение сигнала на середину экрана;
- установите ручку аттенюатора “ Плавно “ в положение **CAL** (калиброванное); (6 делений по вертикали и 8 делений по горизонтали);
- ручками “ Смещение X, Y ” совместите верхний или нижний уровень сигнала с одной из линий экрана;
- амплитуда сигнала определяется как произведение выбранного значения коэффициента отклонения K (положение переключателя“ **VOLTS/DIV** ”) на измеренную величину сигнала в делениях шкалы экрана (по вертикали).

$$\text{Амплитуда} = K \times N$$

При работе с делителем «1 : 10» полученный результат нужно умножить на 10.

2. Измерение величины постоянного напряжения:

- переключатель вида входа канала Y установите в положение “**DC**” (открытый вход);
- величина поданного на вход Y напряжения определяется как произведение установленного значения коэффициента отклонения K (положение переключателя“ **VOLTS/DIV** ”) на величину отклонения (по вертикали) горизонтальной линии луча (в делениях шкалы экрана) N ;

$$\text{Постоянное напряжение} = K \times N$$

- при этом смещение луча вверх относительно первоначального положения соответствует подаче на вход прибора положительного напряжения, а смещение вниз – отрицательного напряжения.

3. Измерение временных параметров:

- ручками “Смещение X, Y” выведите изображение измеряемого временного интервала в центр экрана;
- установите калибранный режим развёртки, повернув ручку “ Плавно “ в положение **CAL** (калиброванное);
- выберите ручкой-переключателем развёртки “ **TIME / DIV** ” коэффициент развёртки, то есть подходящую длительность перемещения луча по горизонтали;
- при увеличении длины измеряемого интервала на экране точность измерения времени увеличивается;
- измерения проводите по левому или правому краю линии;
- измеряемый интервал времени определяется как произведение величины выбранного коэффициента развёртки K (положение переключателя “ **TIME / DIV** ”) на измеренную величину интервала времени в делениях шкала экрана N (по горизонтали)

$$\text{Интервал времени } \Delta t = K \times N$$

4. Измерение частоты сигнала:

- измерьте период сигнала (интервал времени) T ;
- определите частоту как величину, обратно пропорциональную периоду T .

$$\text{Частота} = 1 / T$$

Контрольные вопросы

1. Назначение и устройство электронного осциллографа. Принцип работы.
2. Назначение , устройство и принцип работы отдельных частей (элементов) электронно-лучевой трубки.
3. Что называется осциллограммой ?
4. В каком элементе электронно-лучевой трубы используется явление термоэлектронной эмиссии ?
5. Что называется чувствительностью электронно-лучевой трубы?

6. По каким траекториям движется электрон между отклоняющими пластинами при подаче на эти пластины: а) постоянного напряжения б) синусоидального напряжения в) пилообразного напряжения?
7. Каким образом изменяется яркость изображения на экране?
8. Как осуществляется фокусировка электронного луча?
9. От чего зависит число установившихся синусоид напряжения при подаче на вход осциллографа переменного(синусоидального) напряжения? Соотношение (условие), при котором на экране осциллографа наблюдается устойчивая осциллограмма ?
10. Какова частота развёртки, если на экране осциллографа наблюдается два периода исследуемого напряжения частотой 1000 Гц?
11. Назначение схемы (блока) синхронизации. Виды синхронизации.

1.11 Лабораторная работа № ЛР-11 (2 часа)

Тема: «Снятие температурной характеристики терморезистора»

1.1.1 Цель работы: Ознакомиться со свойствами полупроводниковых терморезисторов.

1.1.2 Задачи работы:

1. Ознакомиться со свойствами полупроводниковых терморезисторов;
2. Измерение (снятие) температурной характеристики терморезистора

1.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. терморезистор,
2. цифровой мультиметр,
3. термометр технический,
- 4.электрическая плитка лабораторная,
5. стакан металлический,
6. штатив с муфтой и лапкой,
- 7.соединительные провода.

1.1.4 Описание (ход) работы:

1. Изучить теоретическое введение и записать основные необходимые сведения о свойствах полупроводников и полупроводниковых терморезисторов.
2. Измерение (снятие) температурной характеристики терморезистора
 - Подготовьте в тетради таблицу для записи результатов измерений и вычислений.

Таблица 1

t , °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
R,Ом											

- Соберите измерительную установку. Панель терморезистора укрепите в лапке штатива, а пробирку с терморезистором погрузите в стакан с холодной водой, установленный на

электрической плитке. В пробирку вставьте термометр, а к зажимам терморезистора подключите цифровой мультиметр, подготовленный для измерения сопротивления.

- Измерьте начальную температуру терморезистора (она равна температуре воды в стакане) и начальное сопротивление терморезистора.
- Включите электрическую плитку и нагревайте воду до $90^{\circ} - 100^{\circ}\text{C}$. При температурах $10, 20, 30^{\circ}\text{C}$ и так далее измерьте сопротивление терморезистора. Результаты измерений запишите в таблицу 1.

Примечание. Измерения следует вести вдвоём: один записывает показания термометра, а другой одновременно снимает показания мультиметра.

- По данным таблицы постройте график зависимости сопротивления терморезистора от температуры $R = f(t^{\circ}\text{C})$. По оси абсцисс следует откладывать температуру по шкале Цельсия, а по оси ординат – сопротивление терморезистора в омах.

При этом зависимость сопротивления терморезистора от температуры определяется уравнением

$$R_T = A e^{B/T},$$

где A – коэффициент, зависящий от удельного сопротивления полупроводника и размеров рабочего тела; B – коэффициент температурной чувствительности, определяемый свойствами полупроводника; T – термодинамическая температура.

График зависимости, соответствующий этому уравнению называют **температурной характеристикой терморезистора**. Пример характеристики показан на рисунке 2.

- Сделайте вывод по результатам измерений и ответьте на контрольные вопросы.

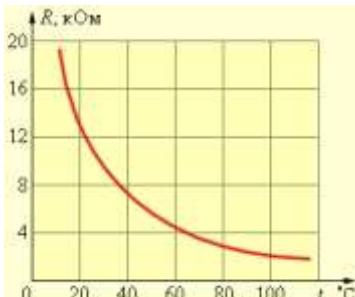


Рис.2 - Температурная характеристика терморезистора.

Контрольные вопросы

1. Полупроводники и их основные свойства.
2. Собственная и примесная электрическая проводимость полупроводников. Свободные носители заряда в полупроводниках. Формула электропроводности полупроводников.
3. Полупроводниковые терморезисторы. Что это такое ? Принцип действия и устройство.
4. Основные параметры и характеристики терморезисторов. Что называется температурной характеристикой терморезистора ? Какой вид она имеет?
5. Что такое терморезисторы типов ММТ и КМТ ?
6. Что называется позистором ?
7. Применение терморезисторов. Упрощённая схема температурной сигнализации, использующая терморезистор.

Приложение

1. **Основные параметры и характеристики терморезисторов прямого подогрева:**
 - температурный коэффициент сопротивления ТКС;

- коэффициент температурный чувствительности B - это коэффициент в показателе экспоненты температурной характеристики терморезистора (в формуле 6). Единица измерения – К (кельвин);
- номинальное сопротивление терморезистора $R_{T_{nom}}$ - это сопротивление терморезистора при определённой температуре окружающей среды. Обычно для большинства терморезисторов это 20°C или 25°C;
- диапазон рабочих температур ΔT ;
- максимально допустимая температура – это температура, при которой ещё не происходит необратимых изменений параметров и характеристик терморезисторов;
- максимально допустимая мощность рассеяния P_{max} - это мощность при которой терморезистор, находящийся в спокойном воздухе при температуре 20°C, разогревается при прохождении тока до максимально допустимой температуры
- постоянная времени τ - промежуток времени, в течение которого температура терморезистора уменьшится в $e = 2,718$ раз от выбранного перепада температур (например, при переносе его из воздушной среды с температурой 120 °C в воздушную среду с температурой 20 °C). Этот параметр характеризует способность терморезистора быстро принимать температуру окружающей среды, то есть его тепловую инерционность. Для разных типов терморезисторов постоянная времени лежит в пределах от 0,5 до 140 с.
- температурная зависимость - зависимость сопротивления терморезистора от температуры;
- статическая вольт-амперная характеристика - зависимость падения напряжения на терморезисторе от проходящего через него тока в условиях теплового равновесия между терморезистором и окружающей средой.

2. Некоторые характеристики основных типов медно-марганцевых (ММТ) и кобальто-марганцевых терморезисторов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Тип термо-резистора	Пределы номинального сопротивления, кОм, при 20°C	$\pm \Delta R_{nom}$, %	Коэффициент температурной чувствительности, К	Температурный коэффициент сопротивления, %/°C, при 20°C	Диапазон рабочих температур, °C
КМТ-1	22—1000	20	3600—7200	4,2—8,4	-60÷+80
ММТ-1	1—220	20	2060—4300	2,4—5	-60÷+125
КМТ-4а,	22—1000	20	3600—7200	4,2—8,4	-60÷+125
КМТ-4б					
CCT-4а,	1—220	20	2060—4300	2,4—5	-60÷+125
ММТ-4б					
ММТ-6	10—100	20	2060	2,4	-60÷+125
КМТ-8	0,1—10	10; 20	3600—7200	4,2—8,4	-40÷+70
ММТ-8	0,001—1	10; 20	2060—3430	2,4—4	-40÷+70
ММТ-9	0,01—4,7	10; 20	2060—4300	2,4—5	-60÷+125
КМТ-10*	100—330	20	3600	4,2	0÷+125
КМТ-11*	100—3300	20	3600	4,2	0÷+125
КМТ-12	0,1—10	30	3600	4,2	-40÷+120
ММТ-12	0,0047—1,0	30	2060—3430	2,4—4	-60÷+120
ММТ-13а,	0,01—2,2	20	2060—4300	2,4—5	-60±+120
ММТ-13б					
КМТ-14	0,51—7500**	30	4100	2,3—3,9**	-10÷+300

1.12 Лабораторная работа № ЛР-12 (2 часа)

Тема: «Изучение характеристик фоторезистора»

1.12.1 Цель работы: Изучение и измерение характеристик фоторезистора

1.12.2 Задачи работы:

1. Ознакомиться со свойствами фоторезисторов;
2. Измерить зависимость фототока от напряжения при постоянной освещённости (вольт-амперная характеристика).
3. Измерить световую характеристику фоторезистора.

1.12.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. фоторезистор,
2. оптическая скамья, осветитель,
3. миллиамперметр, вольтметр или цифровой мультиметры,
4. соединительные провода.

1.12.4 Описание (ход) работы:

1. Изучить теоретическое введение и записать основные необходимые сведения о свойствах полупроводников и полупроводниковых фоторезисторах.

Теоретическое введение

Фоторезистор представляет собой полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого изменяется под действием светового потока, то есть при поглощении падающего на него электромагнитного излучения (света).

Принцип работы фоторезистора основан на физическом явлении, называемым **внутренним фотоэффектом или фотопроводимостью**. Это явление заключается в образовании дополнительных свободных носителей заряда в полупроводнике в результате поглощения им электромагнитного излучения (света). Дополнительные свободные носители заряда, возникающие при освещении, образуют дополнительную электропроводность полупроводника, также называемую фотопроводимостью.

При внутреннем фотоэффекте поглощённая световая энергия идёт на внутреннее высвобождение связанных с атомами валентных электронов. В отличие от внешнего фотоэффекта освобождённые электроны не покидают полупроводник, а некоторое время проводят в свободном состоянии, находясь в межатомных промежутках.

При внутреннем фотоэффекте поглощаемое электромагнитное излучение (свет) передаёт свою энергию связанным электронам. При этом связанному электрону передаётся энергия одного фотона hv .

Поэтому освобождение связанного электрона и его переход в пространство между атомами возможно только при условии, что энергия фотона равна или больше ширины запрещённой зоны полупроводника $hv \geq E_g$. В этом случае в полупроводнике образуются электронно-дырочные пары, которые увеличивают его электропроводность, то есть уменьшают сопротивление полупроводника.

Частота электромагнитного излучения (волн), удовлетворяющая условию $hv_{kp} = E_g$, называется красной или длинноволновой границей фотопроводимости. Здесь E_g – ширина запрещённой энергетической зоны полупроводника. Дело в том, что излучение с частотой $v < v_{kp}$ не может вызвать фотопроводимость, так как энергия фотона такого излучения недостаточна для освобождения связанного электрона $hv < E_g$. Критической частоте v_{kp} соответствует граничная (красная или длинноволновая граница) длина волны $\lambda_{kp} = c / v_{kp}$. Если же энергия фотонов $hv \geq E_g$, то избыточная энергия фотонов передаётся электронам в виде кинетической энергии.

В полупроводниковом фоточувствительном слое фоторезистора, находящемся в темноте, при определённой температуре всегда имеется некоторая концентрация свободных носителей заряда. Этими носителями определяется ток проводимости фоторезистора, возникающий при подаче напряжения на него и называемый темновым током I_T . Световой поток, падая на фоточувствительный слой фоторезистора, может генерировать дополнительные носители заряда. Участвуя в электропроводности, они

создают дополнительную проводимость, называемую фотопроводимостью. Общий ток освещённого фоторезистора называется световым и обозначают I_C . Разность между световым и темновым токами $I_\Phi = I_T - I_C$ называется фототоком проводимости.

Наряду с процессом генерации дополнительных (избыточных) носителей заряда под действием светового излучения, в полупроводнике имеет место обратный процесс воссоединения свободных электронов и дырок, называемый рекомбинацией. Рекомбинация уменьшает концентрацию свободных носителей заряда. Этот процесс в основном определяется природой полупроводника, а также видом и концентрацией примесных атомов, содержащихся в нём. При непрерывном освещении устанавливается динамическое равновесие, при котором число генерируемых электронов равно числу рекомбинирующих. В этом состоянии в полупроводнике возникает некоторое постоянное дополнительное количество свободных зарядов, которые определяют дополнительную проводимость, то есть фотопроводимость.

Конструкция и параметры фоторезисторов. Для изготовления фоторезисторов используют наиболее фоточувствительные полупроводники: кремний, германий, селен, а также соединения свинца, кадмия и другие. Наибольшее распространение получили фоторезисторы на основе сульфида кадмия CdS, селенида кадмия CdSe и сернистого свинца PbS.

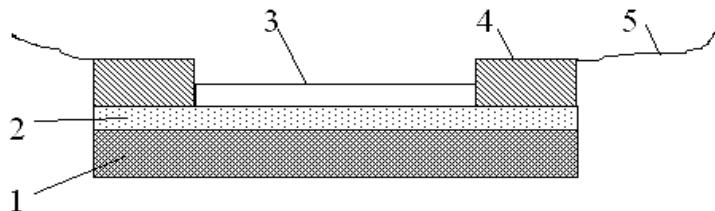


Рис. 1. Схема устройства фоторезистора

Основным рабочим элементом фоторезистора является тонкий светочувствительный слой (элемент) из полупроводника (рис.1). У одних фоторезисторов этот слой представляет собой спрессованную из порошкообразного полупроводника прямоугольную таблетку, у других – тонкий слой полупроводникового материала (2) на стеклянной или керамической подложке (1). На поверхность светочувствительного слоя наносят два металлических электрода (4). В качестве электродов обычно применяют тонкие пленки металлов, не подвергающихся коррозии (золото, платина, серебро), наносимых испарением в вакууме. К электродам подсоединенны соединительные выводы (5) для включения фоторезистора в электрическую цепь. Для защиты от влияния влаги, воздуха и других внешних

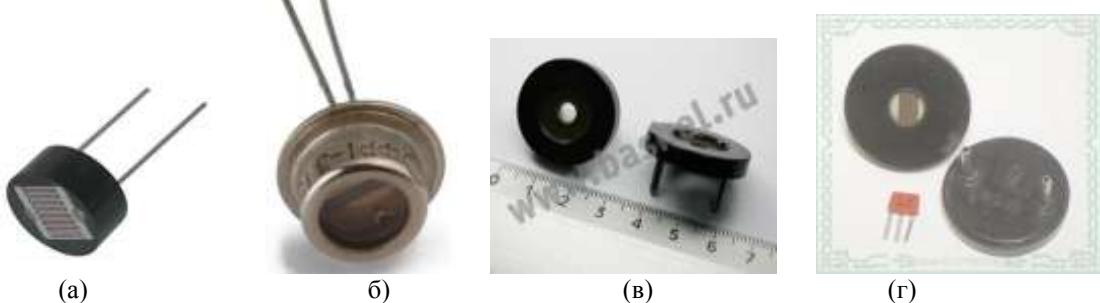


Рис.3 – Фоторезисторы различных типов: а – с рабочей площадкой в виде меандра, б – фоторезистор ФР1-3 (темная прямоугольная полоска - светочувствительный слой), в – фоторезисторы ФСК-6, г – фоторезисторы ФС-3 .

воздействий фоточувствительный слой покрывают прозрачным лаком (3) и помещают в металлический или пластмассовый корпус, имеющий окошко для прохождения светового потока. Поверхность фоточувствительного слоя, заключённую между электродами, называют рабочей площадкой. Фоторезисторы делают с рабочими площадками различной формы и размеров: прямоугольными, в виде меандра или кольца (рис.2). Внешний вид и обозначение фоторезисторов на электрических схемах показаны на рис.3 и 4.

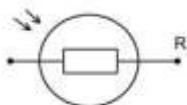


Рис.4 – Обозначение фоторезистора.

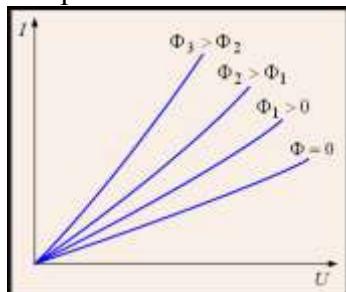


Рис.5 – Вольт-амперные характеристики фоторезистора при разных значениях светового потока Φ .

Основные характеристики фоторезисторов:

Вольт-амперная характеристика – это зависимость светового тока и фототока (при неизменном световом потоке), а также темнового тока от приложенного к фоторезистору напряжения. В рабочем диапазоне напряжений вольт-амперные характеристики линейны (рис.5).

Световая или люкс-амперная характеристика – это зависимость фототока от падающего светового потока или от освещённости. Фоторезисторы обычно имеют нелинейную световую характеристику (рис.6). При больших освещённостях увеличение фототока отстает от роста светового потока и намечается тенденция к насыщению. Это объясняется тем, что при увеличении светового потока с ростом концентрации генерируемых носителей заряда растёт вероятность их рекомбинации.

Спектральная характеристика – это зависимость фототока от длины волны падающего света. Спектральные характеристики обычно изображают в виде графиков (рис.7). Как видно, фоторезисторы обладают различными спектральными характеристиками в зависимости от материала, использованного для фоточувствительного слоя.

Сернисто-кадмиеевые фоторезисторы имеют высокую чувствительность в видимой области спектра, селенисто-кадмиеевые – в красной части спектра, а также чувствительны в ближней инфракрасной области спектра. У сернисто-свинцовых фоторезисторов максимум чувствительности лежит в инфракрасной области спектра, что даёт возможность использовать их для наблюдения и регистрации излучений слабо нагретых тел.

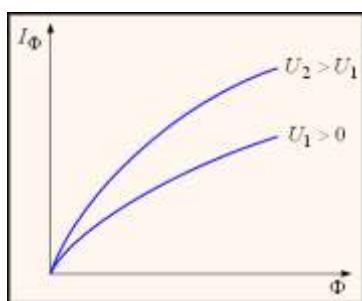


Рис.6

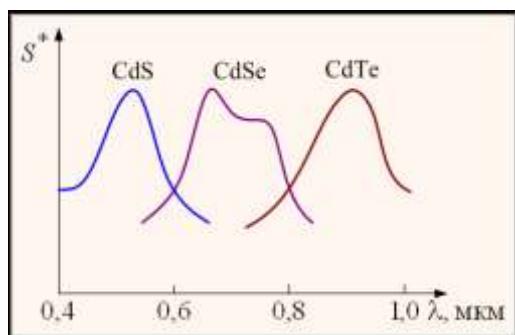


Рис.7

Параметры фоторезисторов:

Темновое сопротивление R_t – это сопротивление фоторезистора при отсутствии освещения.

Темновой ток I_T - ток, протекающий в цепи фоторезистора при приложенном рабочем напряжении при отсутствии освещения.

Световой ток I_{cv} – ток через фоторезистор при приложенном напряжении и освещённости 200 лк.

Интегральная чувствительность $k_\phi = I_\phi / \Phi \cdot U$ – это отношение величины фототока к величине падающего светового потока Φ , имеющего сложный спектральный состав, и к величине приложенного напряжения U .

Кратность изменения сопротивления $k_R = R_T / R_{cv}$ – отношение темнового сопротивления к сопротивлению фоторезистора при освещённости 200 лк (люкс).

Характеризует фоточувствительность фоторезистора.

Рабочее напряжение U – это напряжение, при котором фоторезистор работоспособен в течение указанного срока службы. Значения рабочих напряжений взяты при освещённости 200 лк.

Допустимая мощность рассеивания P_{max} – максимальная мощность, рассеиваемая на фоторезисторе без его теплового повреждения.

Постоянная времени τ – это время, в течение которого фототок фоторезистора изменяется при освещении или при затемнении фоторезистора на 63 % (в $e = 2,71$ раз) по отношению к установленному значению.

Эта величина характеризует скорость реакции фоторезистора на изменение светового потока, то есть характеризует его инерционность. Инерционность фоторезистора определяется временем, в течение которого носители заряда, освобожденные светом, находятся в возбуждённом (свободном) состоянии.

Основные параметры некоторых фоторезисторов приведены в таблице.

Таблица

Тип фоторезистора	Допустимая мощность рассеивания, Гц	Рабочее напряжение, В	Темновое сопротивление, Мом	Темновой ток I_T , мА	Световой ток (фототок) I_{cv} , мА	Отношение R_T/R_{cv}	Интегральная чувствительность, А/лм	Удельная чувствительность K_s , 10^{-5} мА/(ж-В)
Селенисто-кадмневые:								
ФСД-1а	0,05	20	2	1	3	2000	15	30
ФСД-1	0,05	20	2	1	3	2000	15	30
ФСД-Г1	0,05	20	2	1	3	2000	15	30
СФЗ-1	0,01	15	30	0,01	1,5	150 000	20	600
Сернисто-кадмневые:								
ФСК-1а	0,125	50	3,3	5	2	400	7,8	7
ФСК-1	0,125	50	3,3	5	2	400	2,8	7
ФСК-2	0,125	100	3,3	10	1	100	0,5	1,6
ФСК-4а	0,125	25	1,6	5	2	400	3,0	15
ФСК-5	0,05	50	10	1	1	1000	5,0	220
ФСК-6	0,20	50	3,3	5	2	400	0,78	6
ФСК-7а	0,35	50	0,5	10	0,5	50	0,15	0,25
ФСК-7б	0,35	10	0,1	10	3	300	3,6	7,5
ФСК-Г7	0,35	50	5	5	2	400	0,7	1,8
ФСК-Г1	0,12	50	3,3	5	2	400	2,1	7
ФСК-Г2	0,2	50	1,6	10	6	800	2,1	7
ФСК-П1	0,1	100	100	0,01	2	200 000	4,8	8
СФ2-1	0,01	15	15	0,5	1	2000	10	400
СФ2-2	0,05	2	2	0,5–0,2	1,5	3000	0,36	75
СФ3-2	0,1	5	5	0,5	2	4000	—	80
ФСК-М1	0,03–0,06	70	700	0,1	0,3	10^4 – 10^6	0,5–3	35–50
ФСК-М2	0,03–0,06	70	70	1	1	10^4 – 10^6	3–10	35–50
Сернисто-свинцовевые:								
ФСА-1	0,01	2–100	0,022–1	—	—	1,2	—	0,5
ФСА-1а	0,01	2–100	0,022–1	—	—	1,2	—	0,5
ФСА-6	0,01	5–30	0,05–0,3	—	—	1,2	—	0,5
ФСА-Г1	0,01	4–40	0,047–0,47	—	—	1,2	—	0,5
ФСА-Г2	0,01	4–40	0,047–0,47	—	—	1,2	—	0,5

Фоторезистор имеет одинаковую проводимость в обоих направлениях (в нем нет р-п-переходов), поэтому он включается последовательно с управляемым им устройством и источником тока. Схема включения фоторезистора показана на рис.8.

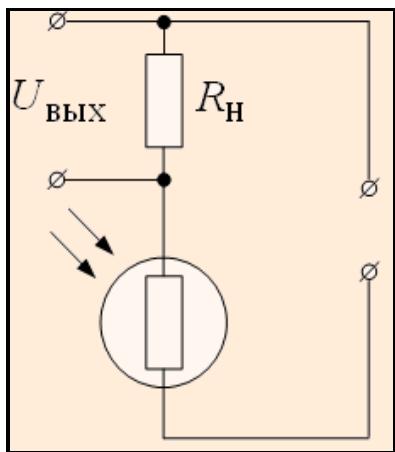


Рис.8

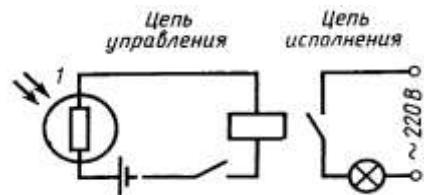


Рис.9

При отсутствии освещения ($\Phi = 0$) фоторезистор обладает большим темновым сопротивлением R_T , поэтому темновой ток мал и определяется выражением:

$$I_T = E / (R_T + R_h) \quad (1)$$

При наличии светового потока ($\Phi > 0$) сопротивление резистора уменьшается до значения R_{cb} , определяющего вместе с источником тока E световой ток;

$$I_{cb} = E / (R_{cb} + R_h) \quad (2)$$

Разность этих токов $I_{cb} - I_T$ определяет фототок:

$$I_\Phi = E / (R_T + R_h) - E / (R_{cb} + R_h) \quad (3)$$

Фоторезистор может реагировать не только на появление светового потока, но и на его исчезновение, то есть является световым реле. При отсутствии освещения или при постоянном освещении фоторезистор представляет собой активное сопротивление, и ток, протекающий по нему, пропорционален приложенному напряжению, а в случае постоянной величины напряжения величина тока пропорциональна интенсивности действующего светового потока.

Если фоторезистор включен последовательно с источником тока E и с резистором нагрузки R_h (рис. 8), то изменения светового потока Φ сопровождаются изменением тока в цепи, то есть фоторезистор может работать и как вакуумный фотоэлемент для преобразования световой энергии в электрическую.

Применение фоторезисторов.

- Фоторезисторы имеют рабочие токи, измеряемые миллиамперами, что даёт возможность на их основе выполнять простые и надёжные фотореле без усилителей. Основные промышленные типы фоторезисторов могут работать в схемах, питание которых осуществляется непосредственно от сети с напряжением 127 В и 220 В.

На рис.9 приведена схема фотореле с непосредственным включением в цепь последовательно с фоторезистором. Фотореле работает от источника постоянного напряжения, при этом световой ток фоторезистора должен быть достаточным для срабатывания электромагнитного реле. В этом случае при освещении фоторезистора контакты реле в цепи управления замыкаются и лампочка начинает светиться.

- Фоторезисторы осуществляют функции датчиков контроля за обрывом различных изоляционных лент, бумаги и т.п. При сборке электрических машин используются устройства с фоторезисторами типа ФСК для разбраковки подшипников.
- Фоторезисторы применяются в фотоэлектрических пирометрах (оптических устройствах для бесконтактного измерения температуры), где интенсивность светового потока и спектральное распределение являются функциями измеряемой температуры.
- Фоторезисторы успешно применяются также в схемах измерения прозрачности жидкости и газовых сред (дымномеры, фотопылемеры, рефрактометры, колориметры).

- Широкое применение фотодиоды нашли в области автоматизации производственных процессов, где их используют для измерения качества поверхности (шероховатости) и в приборах для контроля размеров деталей, линейных размеров и перемещений. Так, например, фотодиоды ФСК-6 и ФСА-6 применяют в фотокопирах, позволяющих обрабатывать детали по чертежу.

Задание 1. Измерить (снять) зависимость фототока от напряжения при постоянной освещённости (вольт-амперная характеристика).

1. Собрать электрическую схему, приведенную на рис.10.

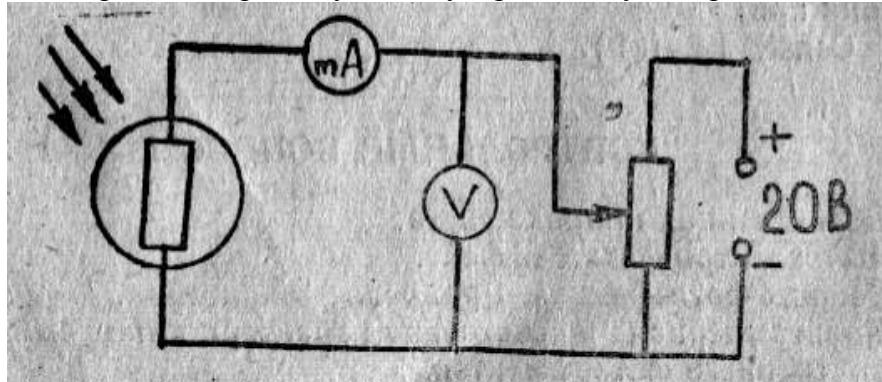


Рис.10

2. На некотором расстоянии от лампы (осветителя) установить фотодиод (микроамперметр не должен зашкаливать), и, изменяя напряжение от 0 до 20 В через каждые 2 В, записать показания микроамперметра в делениях шкалы.
3. Изменить положение фотодиода относительно лампы (осветителя), и, снова, изменяя напряжение, записать показания микроамперметра.
4. Построить графики зависимости $I_\phi = f(U)$ при постоянном световом потоке $\Phi = \text{const}$.

Задание 2. Измерить (снять) световую характеристику фотодиода.

1. На некотором расстоянии от лампы установить фотодиод. Подать напряжение 12 В, записать показания микроамперметра в делениях шкалы.
2. Изменяя расстояние между фотодиодом и лампой на 5 см каждый раз и оставляя напряжение на фотодиоде неизменным, записать показания микроамперметра.
3. Для каждого наблюдения (измерения) рассчитать значение светового потока Φ , падающего на фотодиод, по формуле:

$$\Phi = E \cdot S$$

где Φ - световой поток (в лм, люменах); E – освещённость (в лк), S - площадь рабочей площадки фотодиода (в м^2).

4. Построить график зависимости фототока от светового потока $I_\phi = f(\Phi)$ при постоянном напряжении $U = \text{const}$.
5. Определите отношение темнового сопротивления фотодиода к световому сопротивлению R_m / R_{cb} (при напряжении 20 В) для светового потока, соответствующему расстоянию $r = 30$ см от источника света.
6. Сделать выводы по работе и ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что такое фотон? Формула энергии фотона.
2. Что называется внутренним фотоэффектом?
3. Что происходит в полупроводнике при внутреннем фотоэффекте? Механизм этого явления.
4. Возможно ли возникновение внутреннего фотоэффекта в полупроводнике, если энергия фотонов падающего на него света: $h\nu < E_g$, $h\nu > E_g$, $h\nu = E_g$?
5. Что называется фотопроводимостью?

6. Какое устройство называется фоторезистором? Принцип его работы и конструкция.
7. Какие полупроводниковые материалы используют для изготовления фоторезисторов?
8. Основные характеристики и параметры фоторезисторов?
9. Применение фоторезисторов. Схема фотореле на фоторезисторе.

1.13 Лабораторная работа № ЛР-13 (2 часа)

Тема: «Измерение вольт-амперной характеристики полупроводникового диода»

1.13.1 Цель работы: Изучение вольт-амперной характеристики полупроводникового диода.

1.13.2 Задачи работы:

1. Измерение зависимости прямого тока диода от величины приложенного к нему напряжения (прямой ветви вольт-амперной характеристики).
2. Измерение зависимости обратного тока диода от величины приложенного к нему напряжения (обратной ветви вольт-амперной характеристики диода).
3. Построить график вольт-амперной характеристики диода.

1.13.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. полупроводниковый диод,
2. источник постоянного напряжения,
3. реостат (потенциометр),
4. вольтметр и миллиамперметр (или цифровые мультиметры),
5. соединительные провода.

1.13.4 Описание (ход) работы:

1. Изучить теоретическое введение и записать основные сведения о формировании, структуре и свойствах электронно-дырочного перехода.

В электронной технике полупроводниковые приборы играют огромную роль. Во многих полупроводниковых приборах имеется один или несколько электронно-дырочных переходов.

Электронно-дырочным переходом или $p - n$ переходом (пэ-эн переходом) называют границу раздела областей полупроводника с различным типом электрической проводимости. Одна область полупроводника (p – область) имеет дырочную проводимость, другая область (n – область) обладает электронной проводимостью. В полупроводнике n -типа основными носителями заряда являются электроны; их концентрация значительно превышает концентрацию дырок ($n \gg p$). В полупроводнике p -типа основными носителями заряда являются дырки ($p \gg n$).

При контакте двух полупроводников p - и n -типов начинается процесс диффузии. Дырки из p -области, где их много, переходят в n -область, где их мало. Электроны, наоборот, из n -области перемещаются в p -область. В результате в n -области вблизи контакта уменьшается концентрация электронов и возникает положительно заряженный слой, состоящий из положительных ионов донорных атомов. В p -области уменьшается концентрация дырок и возникает отрицательно заряженный слой, образованный отрицательными ионами акцепторной примеси. Таким образом, в области контакта полупроводников образуется двойной электрический слой, электрическое поле которого препятствует процессу диффузии электронов и дырок навстречу друг другу. Этот слой часто называют **запирающим или запорным**, его толщина от нескольких десятых долей

микрона до микрона. Объемные заряды этого слоя создают между p - и n -областями напряжение U , приблизительно равное $0,35\text{ V}$ для германиевых $p - n$ -переходов и $0,5 - 0,6\text{ V}$ для кремниевых $p - n$ -переходов.

Электронно – дырочный переход обладает свойством односторонней проводимости.

Если полупроводник с $p - n$ -переходом подключен к источнику тока так, что положительный полюс источника (плюс) соединен с n -областью, а отрицательный полюс (минус) соединен с p -областью, то напряженность электрического поля в запирающем слое возрастает. Переход основных носителей заряда через границу раздела этих областей будет еще больше затруднен. Ток через $p - n$ -переход практически не идет. Напряжение данной полярности, поданное на $p - n$ -переход, в этом случае называют обратным, как и ток, текущий через него. Незначительный обратный ток обусловлен наличием небольшой концентрации неосновных носителей заряда, свободных электронов в p -области и дырок в n -области. Этот ток (обратный) очень мало и слабо увеличивается при увеличении обратного напряжения. При таком включении внешнего напряжения переход представляет собой большое сопротивление, а ток и приложенное напряжение условно считают отрицательными.

Если $p - n$ -переход соединить с источником так, чтобы «плюс» источника был соединен с p -областью, а «минус» – с n -областью, то напряженность поля в запирающем слое будет уменьшаться, что облегчает переход основных носителей через контактный слой. Дырки из p -области и электроны из n -области, двигаясь навстречу друг другу, будут пересекать $p - n$ -переход, создавая ток в прямом направлении. Сила тока через $p - n$ -переход в этом случае будет возрастать при увеличении напряжения источника.

Зависимость силы тока, текущего через $p - n$ -переход, от величины приложенного к нему напряжения называется вольт – амперной характеристикой и приблизительно описывается выражением

$$I = I_h \cdot \exp(eU / nkT) - 1$$

где I – сила тока через, I_h – ток насыщения, U – внешнее напряжение на $p - n$ -переходе, T – температура, k – постоянная Больцмана, n – фактор идеальности $p - n$ -перехода, e – элементарный заряд. График вольт-амперной характеристики кремниевого $p - n$ -перехода показан на рис.1.

Изготовление. $p - n$ -Переходы изготавливают введением небольшого количества примеси в тонкий поверхностный слой полупроводника. По способу изготовления различают сплавные и диффузионные $p - n$ -переходы. Для образования сплавного $p - n$ -перехода на поверхность полупроводникового кристалла помещают электронный материал – металл или сплав; система нагревается до температуры, при которой осуществляется сплавление, и после небольшой выдержки охлаждается. Диффузионный $p - n$ -переход получают диффузией примеси в полупроводник.

В данной работе нужно исследовать зависимость прямого и обратного тока германиевого плоскостного диода $\Delta 7$ от величины приложенного к нему напряжения и построить график этой зависимости (вольт-амперной характеристики). Конструкция сплавного маломощного германиевого диода $\Delta 7$ показана на рисунке 6. Основной элемент диода – пластинка монокристаллического германия 5. В одну сторону пластинки вплавлен шарик индия 4. В результате в пластинке, имевшей вначале электронную проводимость, образовалась область германия с дырочной проводимостью и на границе раздела исходного германия n -типа и слоя германия p -типа возник $p - n$ -переход. С другой стороны пластинка припаяна припом с примесью сурьмы 8 к основанию металлического корпуса 6, защищающего кристалл от внешних воздействий и имеющего внешние выводы 1 и 7. Металлическая трубка 2 вплавлена в стеклянный изолятор 3.

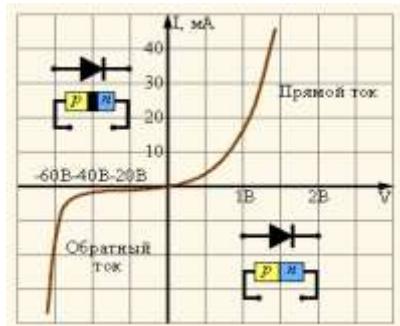


Рис.1. Вольт-амперная характеристика кремниевого p-n перехода

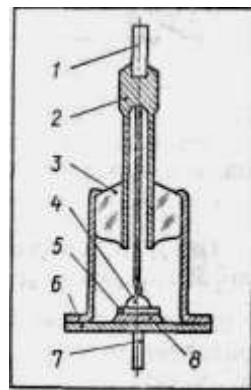


Рис.2. Конструкция сплавного германиевого диода

Задание 1. Измерение зависимости прямого тока диода от величины приложенного к нему напряжения (прямой ветвь вольт-амперной характеристики).

1. Подготовьте в тетради таблицы 1 и 2 для записи результатов измерений.

Таблица 1,2

U, V								
I, mA								

2. Соберите электрическую цепь, показанную на рис.3. Диод включите в прямом (пропускном) направлении, обратив внимание на знаки + и -, указанные на его панели. Зарисуйте схему электрической цепи в тетради.

Источником тока в работе служит источник постоянного напряжения (ИН), имеющий на выходе регулируемое постоянное напряжение от 0 до 12 В. Напряжение на диод подается с потенциометра R и измеряется вольтметром, включенном на предел 2 или 3 В. Прямой ток измеряется цифровым мультиметром, включенном вначале на предел 20 мА, а затем на предел 200 мА.

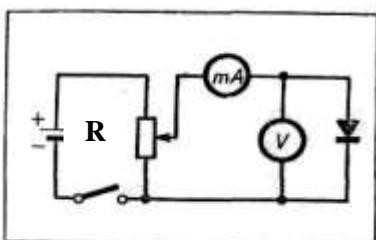


Рис.3

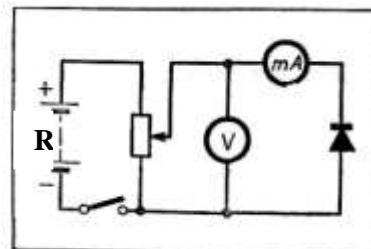


Рис. 4

3. Установите ручкой плавной регулировки источника тока напряжение, подаваемое на потенциометр R , 6 – 12 В. Напряжение на диод поступает с потенциометра R . Его величина зависит от величины выходного напряжения источника тока и положения подвижного контакта потенциометра. Перемещая подвижный контакт потенциометра и при необходимости регулятор напряжения источника тока, увеличивайте прямое напряжение на диоде от нуля до 0,5 – 0,6 В с шагом примерно 0,02 - 0,04 В. Запишите показания обоих приборов, то есть значения силы тока I и напряжения U , в таблицу 1.

Сила тока при увеличении напряжения на диоде будет постепенно, а затем резко возрастать.

Внимание. Прямой ток диода не должен превышать 250 – 300 мА.

Задание 2. Измерение зависимости обратного тока диода от величины приложенного к нему напряжения (обратной ветви вольт-амперной характеристики диода).

1. Соберите электрическую цепь по новой схеме (рис.4), обратив внимание на отличие включения диода и вольтметра. Зарисуйте схему цепи в тетради.

2. Установите выходное напряжение источника тока 12 В, то есть максимальное значение. Напряжение на диод поступает с потенциометра R и измеряется вольтметром, включенном на предел 15 или 20 В. Сила обратного тока измеряется цифровым мультиметром в режиме измерения постоянного тока на пределе 2000 мкА.3.

Увеличивая обратное напряжение на диоде (с помощью потенциометра) от 0 до 12 В с шагом 1 В, измерьте величину обратного тока диода. Результаты измерений запишите в таблицу 2.

Задание 3. Построить график вольт-амперной характеристики диода.

1. По данным двух таблиц постройте график зависимости силы тока, текущего через диод от приложенного напряжения, то есть график вольт-амперной характеристики диода. Прямой ток и прямое напряжение считайте положительными величинами, а обратный ток и обратное напряжение – отрицательными. По оси абсцисс откладывайте напряжение в вольтах, а по оси ординат – силу тока в миллиамперах. Масштаб для прямого напряжения можно взять 1 см – 0,1 В, для обратного 1 см – 1 В. Масштаб для прямого тока 1 см – 10 мА, для обратного тока 1 см – 0,1 мА.

2. Используя построенную вольт – амперную характеристику диода, определите его сопротивление в прямом R_n и обратном направлениях R_o при напряжении $U = 0,5$ В и вычислите их отношение R_o / R_n .

3. Сделайте вывод об основных свойствах полупроводникового диода.

Контрольные вопросы

1. Полупроводники и их свойства. Примеры полупроводниковых веществ.
2. Свободные носители заряда в полупроводниках.
3. Собственная и примесная проводимость полупроводников.
4. Электронно-дырочный переход. Его вольт-амперная характеристика, график и уравнение вольт-амперной характеристики.
5. Полупроводниковый диод, его конструкция, свойства и назначение.

1.14 Лабораторная работа № ЛР-14 (2 часа)

Тема: «Полупроводниковые выпрямители переменного тока»

1.14.1 Цель работы: ознакомиться с выпрямительными схемами переменного тока.

1.14.2 Задачи работы:

1. Ознакомиться с устройством и работой однополупериодного выпрямителя;
2. Ознакомиться с устройством и работой двухполупериодного выпрямителя.

1.14.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. полупроводниковый диод,
2. диодный мост
3. источник переменного напряжения (частотой 50 Гц, сетевое напряжение)

4. реостат (потенциометр),
5. резистор сопротивлением 100 Ом,
6. конденсаторы ёмкостью 100, 220, 470, 1000 мкФ,
7. электронный осциллограф С1-112м
8. соединительные провода.

1.14.4 Описание (ход) работы:

1. Изучить теоретическое введение и записать основные сведения о структуре и свойствах электронно-дырочного перехода.

В электронной технике полупроводниковые приборы играют огромную роль. Во многих полупроводниковых приборах имеется один или несколько электронно-дырочных переходов.

Электронно-дырочным переходом или $p - n$ переходом (пэ-эн переходом) называют границу раздела областей полупроводника с различным типом электрической проводимости. Одна область полупроводника (p – область) имеет дырочную проводимость, другая область (n – область) обладает электронной проводимостью. В полупроводнике n -типа основными носителями заряда являются электроны; их концентрация значительно превышает концентрацию дырок ($n >> p$). В полупроводнике p -типа основными носителями заряда являются дырки ($p >> n$).

При контакте двух полупроводников p - и n -типов начинается процесс диффузии. Дырки из p -области, где их много, переходят в n -область, где их мало. Электроны, наоборот, из n -области перемещаются в p -область. В результате в n -области вблизи контакта уменьшается концентрация электронов и возникает положительно заряженный слой, состоящий из положительных ионов донорных атомов. В p -области уменьшается концентрация дырок и возникает отрицательно заряженный слой, образованный отрицательными ионами акцепторной примеси. Таким образом, в области контакта полупроводников образуется двойной электрический слой, электрическое поле которого препятствует процессу диффузии электронов и дырок навстречу друг другу. Этот слой часто называют **запирающим или запорным**, его толщина от нескольких десятых долей микрона до микрона. Объемные заряды этого слоя создают между p - и n -областями напряжение U , приблизительно равное 0,35 В для германиевых $p - n$ -переходов и 0,5 - 0,6 В для кремниевых $p - n$ -переходов.

Электронно – дырочный переход обладает свойством односторонней проводимости.

Если полупроводник с $p - n$ переходом подключен к источнику тока так, что положительный полюс источника (плюс) соединен с n -областью, а отрицательный полюс (минус) соединен с p -областью, то напряженность электрического поля в запирающем слое возрастает. Переход основных носителей заряда через границу раздела этих областей будет еще больше затруднён. Ток через $p - n$ -переход практически не идет. Напряжение данной полярности, поданное на $p - n$ -переход, в этом случае называют обратным, как и ток, текущий через него. Незначительный обратный ток обусловлен наличием небольшой концентрации неосновных носителей заряда, свободных электронов в p -области и дырок в n -области. Этот ток (обратный) очень мало и слабо увеличивается при увеличении обратного напряжения. При таком включении внешнего напряжения переход представляет собой большое сопротивление, а ток и приложенное напряжение условно считают отрицательными.

Если $p - n$ – переход соединить с источником так, чтобы «плюс» источника был соединен с p -областью, а «минус» - с n -областью, то напряженность поля в запирающем слое будет уменьшаться, что облегчает переход основных носителей через контактный слой. Дырки из p -области и электроны из n -области, двигаясь навстречу друг другу, будут

пересекать $p-n$ – переход, создавая ток в прямом направлении. Сила тока через $p-n$ – переход в этом случае будет возрастать при увеличении напряжения источника.

Зависимость силы тока, текущего через $p-n$ – переход, от величины приложенного к нему напряжения называется вольт – амперной характеристикой и приблизительно описывается выражением

$$I = I_h \cdot \exp(eU / nkT) - 1$$

где I – сила тока через, I_h – ток насыщения, U – внешнее напряжение на $p-n$ – переходе, T – температура, k – постоянная Больцмана, n – фактор идеальности $p-n$ – перехода, e – элементарный заряд. График вольт-амперной характеристики кремниевого $p-n$ – перехода показан на рис.1.

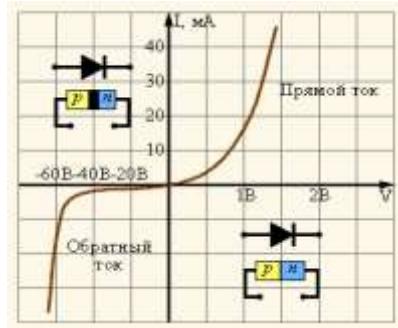


Рис.1. Вольт-амперная характеристика кремниевого $p-n$ перехода

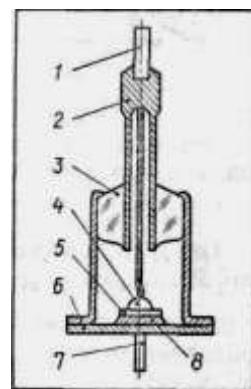


Рис.2. Конструкция сплавного германиевого диода

2. Одним из первых применений полупроводникового диода является выпрямление переменного тока.

Полупроводниковый диод – двухэлектродный полупроводниковый прибор, содержащий один электронно-дырочный переход и два вывода. Заключён в герметичный корпус, защищающий прибор от внешних воздействий (влаги, пыли, света). Основное свойство – односторонняя проводимость электрического тока. Конструкция сплавного германиевого диода показана на рис.2.

Выпрямление переменного тока – преобразование изменяющегося, переменного тока или напряжения в постоянное по направлению (полярности) и величине.

Широко распространены полупроводниковые схемы, состоящие собственно из выпрямителя, преобразующего переменное напряжение в пульсирующее, и дополнительного устройства, уменьшающего изменения величины уже выпрямленного напряжения. Это устройство называется сглаживающий фильтр. Простейший сглаживающий фильтр – это конденсатор достаточно большой ёмкости, подключенный параллельно выходу выпрямителя.

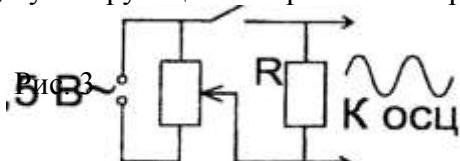
В работе изучаются две выпрямительные схемы: однополупериодная, содержащая один полупроводниковый диод, и диодный мост, состоящий из четырёх полупроводниковых диодов.

Задание 1. Однополупериодное выпрямление переменного тока

1. Соберите схему, показанную на рис.3, и подключите электрический сигнал с резистора R ко входу осциллографа. Наблюдайте осциллограмму в виде синусоиды частотой 50 Гц. Зарисуйте осциллограмму.

2. Включите в цепь диод, как показано на рис.4, и наблюдайте осцилограмму, «обрезанную» снизу. Измените направление включения диода (рис.5) и наблюдайте осцилограмму, «обрезанную» сверху. Зарисуйте осциллографы.

3. Затем в цепь параллельно резистору R включают конденсатор ёмкостью 100 мкФ и наблюдают сглаженную осциллограмму (рис.6). При включении конденсаторов большей ёмкости (220, 470 и 1000 мкФ) осциллограмма становится всё более сглаженной (рис.7). Конденсатор C является сглаживающим фильтром, уменьшающим колебания (изменения) выпрямленного, пульсирующего напряжения. Зарисуйте



осциллографы.

Рис. 4

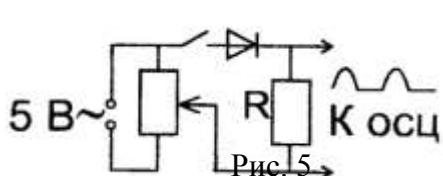


Рис. 5

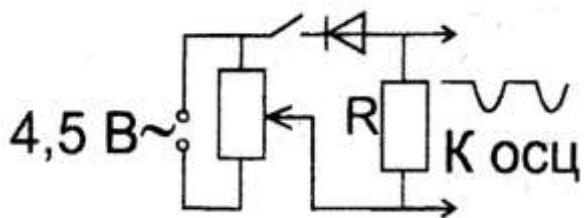
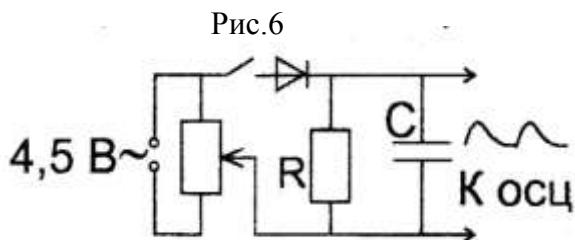


Рис. 7



Задание 2. Двухполупериодное выпрямление переменного тока

- Соберите схему, показанную на рис.8, и подключите электрический сигнал с резистора R ко входу осциллографа. Наблюдайте осциллограмму с частотой пульсаций 100 Гц (рис. 8). Зарисуйте осциллографы.
- Параллельно резистору R включите в цепь конденсатор ёмкостью 100 мкФ и наблюдайте сглаженную осциллограмму (рис. 9).
- При замене конденсатора на конденсаторы большей ёмкости (от 100 до 1000 мкФ) сглаженность осциллограммы становится всё больше, а осциллограмма – всё более прямой (рис.10).
- Сделайте выводы о проделанной работе, о свойствах диодов

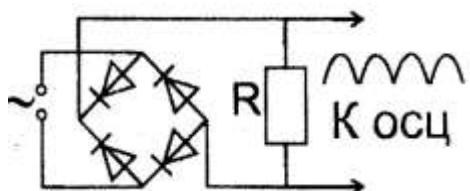


Рис. 8

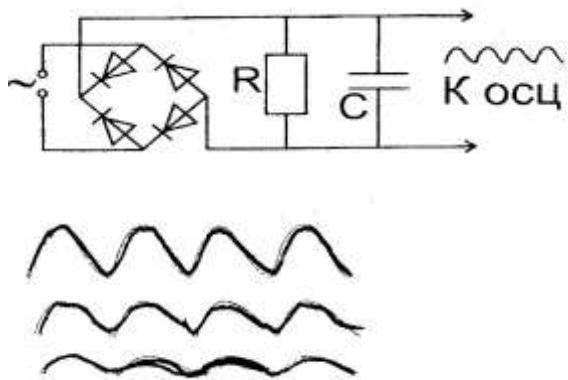


Рис. 10

Контрольные вопросы

1. Электронно-дырочный переход. Его вольт-амперная характеристика, график и уравнение вольт-амперной характеристики.
2. Полупроводниковый диод, его конструкция и свойства
3. Что называют выпрямлением переменного тока? Выпрямителем переменного тока?
4. Однополупериодный выпрямитель переменного напряжения. Схема и работа.
5. Двухполупериодный выпрямитель переменного напряжения (мостовая схема).
6. Сглаживающий фильтр, его назначение.

1.15 Лабораторная работа № ЛР-15 (2 часа)

Тема: «Изучение фотодиода»

1.15.1 Цель работы: Ознакомиться с принципом действия, устройством, характеристиками и применением полупроводниковых фотодиодов.

1.15.2 Задачи работы:

1. Измерение зависимости прямого тока диода от величины приложенного к нему напряжения (прямой ветви вольт-амперной характеристики).
2. Измерение зависимости обратного тока диода от величины приложенного к нему напряжения (обратной ветви вольт-амперной характеристики диода).
3. Построить график вольт-амперной характеристики диода.

1.15.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. фотодиод, ФД-7Г
2. стенд для измерения вольт-амперных характеристик диодов
3. оптическая скамья с осветителем
4. источник постоянного напряжения,
5. осциллограф

1.15.4 Описание (ход) работы:

1. Изучить теоретическое введение и записать основные сведения о формировании, структуре и свойствах фотодиодов с р - п переходом.

Фотодиодом называется полупроводниковый диод, чувствительный к свету и предназначенный для преобразования светового потока (оптического излучения) в электрический сигнал.

Не отличаясь по принципу действия от фотопреобразователя солнечной энергии, фотодиоды имеют свои конструктивные особенности и характеристики, которые определяются их назначением.

Фотодиоды предназначены для применения в качестве приёмников и датчиков оптического излучения (обычно видимого и инфракрасного) в составе аппаратуры и различных приборов, использующих видимое и инфракрасное излучение.

В основе работы фотодиодов лежит явление внутреннего фотоэффекта, при котором под действием света в полупроводнике появляются дополнительные (неравновесные) электроны и дырки, создающие фототок или фотоэдс.

1. Принцип работы фотодиодов с р-п-переходом. В фотодиодах светочувствительным элементом является переходная область - р-п-переход, расположенная между областями с электронной и дырочной проводимостью. Оптическое излучение (свет), поглощаемое в полупроводниковой структуре с р-п-переходом, создает свободные пары "электрон-дырка" при условии, что энергия фотона $h\nu$ превышает ширину запрещенной зоны полупроводника E_g .

Свободные электроны и дырки возникают как в р- и п- областях перехода, так и в непосредственной близости к запирающему слою. Существующее в запирающем слое электрическое поле (поле р-п-перехода) разделяет созданные светом свободные носители заряда в зависимости от их знака в разные части фотодиода: свободные электроны перемещаются в п-область перехода, а дырки перемещаются в р- область, что приводит к зарядению этих областей.

При освещении дырки накапливаются в р-области, заряжая её положительно. Электроны накапливаются в п-области, заряжая её отрицательно. Поэтому между ними возникает разность потенциалов.

При этом возможны два режима работы прибора: в схемах с внешним источником питания и без него. Режим работы фотодиода с внешним источником питания называется фотодиодным, а без внешнего источника питания - режимом генерации фотоэдс (другое название - фотовольтаический режим).

Режим генерации. В этом случае на переход не подано внешнее напряжение и цепь разомкнута. Освещение приводит к накоплению фотоэлектронов в п-области и дырок в р- области. В результате образуется разность потенциалов U_Φ (часто называют «напряжение

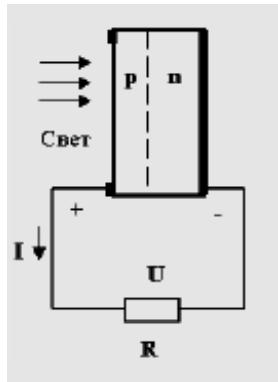


Рис. 1

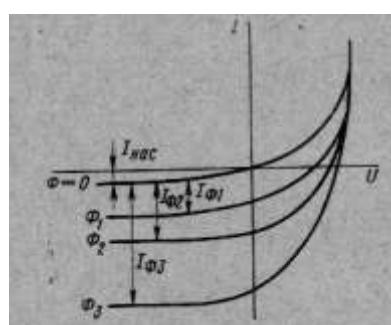


Рис.2 – Вольт-амперные характеристики фотодиода при различных световых потоках ($\Phi_1 < \Phi_2 < \Phi_3$).

холостого хода U_{xx}), то есть появляется фотоэдс. Накопление избыточных электронов и дырок происходит не беспредельно. Одновременно с возрастанием концентрации дырок в дырочной области и электронов в электронной области происходит понижение потенциального барьера перехода на величину фотоэдс и возникает диффузия основных носителей заряда через р-п-переход. Наступает динамическое равновесие.

При подключении к внешним выводам фотодиода нагрузки R_h в её цепи появится ток (рис.1). Во внешней цепи фототок направлен от р-области к п-области. В таких условиях фотодиод работает как преобразователь энергии излучения в электрическую энергию.

Вольт-амперная характеристика освещённого р-п-перехода. Вольт-амперную характеристику р-п-перехода при освещении можно записать в следующем виде:

$$I = I_n \cdot \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] - I_\phi , \quad (1)$$

где I_n - ток насыщения в темноте; I_ϕ - фототок, то есть ток, созданный возбуждёнными светом носителями заряда и проходящий через р-п-переход; U – внешнее напряжение на переходе.

На рис. 2 показаны графики вольт-амперных зависимостей при различных световых потоках Φ . При отсутствии освещения ($I_\phi = 0$) вольт-амперная (темновая) характеристика проходит через начало координат. Остальные кривые, соответствующие определённым световым потокам, смещаются по оси ординат (оси токов) на отрезки, равные силе фототока $-I_\phi$. Из выражения (1) видно, что при обратном включении ($U < 0$) и при ($qU \gg kT$) сила тока через переход $I = - (I_n + I_\phi)$.

Части кривых, расположенные в третьем квадранте, соответствуют фотодиодному режиму работы; части кривых, расположенные в четвёртом квадранте, - режиму генерации фотоэдс.

Если во внешней цепи сила тока $I = 0$ (цепь разомкнута), то из выражения (1) можно найти напряжение холостого хода U_ϕ .

$$U_\phi = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_\phi}{I_n} + 1\right) \quad (2)$$

Если фотодиод в режиме генерации включен во внешнюю цепь с малым сопротивлением, то фотоэлектроны в п-области не накапливаются и $U_\phi = 0$. А поскольку внешнее напряжение отсутствует, то в цепи течёт ток $I = - I_\phi$, часто называемый током короткого замыкания и прямо пропорциональный световому потоку $I_\phi \sim \Phi$.

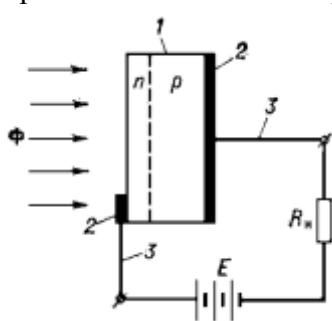


Рис. 3 – Структурная схема фотодиода и схема его включения при работе в фотодиодном режиме:
1 — кристалл полупроводника; 2 — контакты;
3 — выводы; Φ — поток электромагнитного

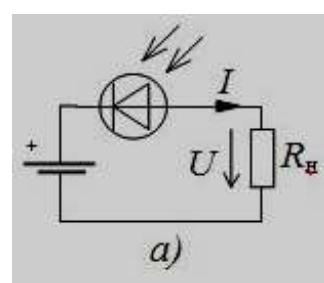


Рис.- 4

излучения; п и р — области полупроводника;
Е — источник постоянного тока; R_h — нагрузка.

Фотодиодный режим. В этом режиме на р-п-переход подано обратное напряжение (р-область подключена к минусу источника напряжения, а п-область к плюсу источника; рис. 3). Схема включает также нагрузочное сопротивление (резистор) R_h . В этом случае переход обладает огромным сопротивлением и через него течёт слабый обратный ток (ток насыщения в темноте I_h). При освещении фотодиода ток через него резко возрастает за счёт возникновения фототока и может значительно превысить темновой ток I_h (рис. 4). Соответственно изменяется и падение напряжения на нагрузочном сопротивлении R_h . При правильном выборе источника напряжения и внешнего сопротивления R_h величина электрического сигнала (напряжения на резисторе) может быть большой и поэтому фотодиоды широко применяются для регистрации и измерения световых сигналов.

Ток через фотодиод в основном определяется потоками неосновных неравновесных носителей заряда (электронов в р-области и дырок в п-области), возникающих при освещении, и не зависит от напряжения, то есть носит характер тока насыщения. Поэтому в фотодиодном режиме наблюдается строгая линейная зависимость фототока от освещённости вплоть до весьма больших значений освещённости. Это является важным достоинством фотодиодов.

Для регистрации переменных оптических сигналов (световых потоков) применяется схема, показанная на рис. 4. Изменяющийся световой поток, падающий на фотодиод, вызывает в цепи переменную составляющую тока, которая повторяет изменения интенсивности света. А на резисторе R_h происходят такие же изменения напряжения, которое и поступает на вход регистрирующей системы. Чтобы отделить (не пропустить) постоянную составляющую напряжения на резисторе, в сигнальной цепи находится разделительный конденсатор C .

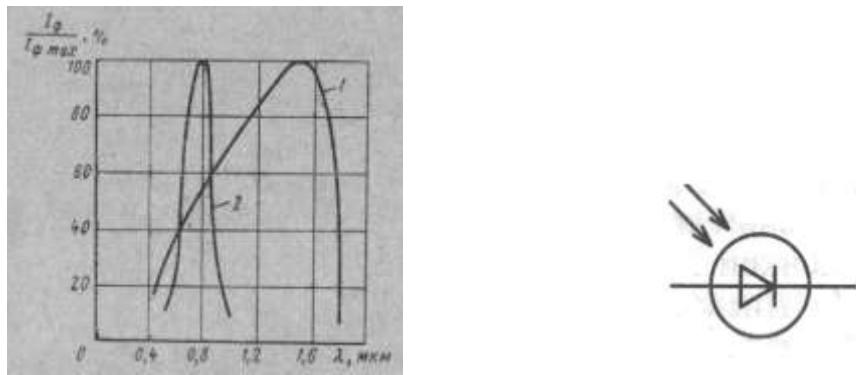
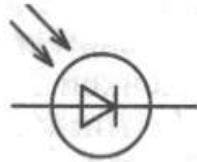


Рис.5 – Спектральные характеристики германиевых (1) и кремниевых фотодиодов (2).

Рис.6 - Условное обозначение фотодиодов



Материалами, из которых изготавливают фотодиоды, служат Ge, Si, GaAs, HgCdTe и другие полупроводниковые соединения.

3. Основные характеристики и параметры фотодиодов

- **Чувствительность S** - параметр, который отражает изменение электрического сигнала (сила тока или напряжение) на выходе фотодиода при его освещении.

Количественно измеряется отношением изменения электрической характеристики (силы тока I_ϕ или напряжения U_ϕ), снимаемой на выходе фотодиода, к потоку излучения Φ , падающему на прибор.

$S_I = I_\phi / \Phi$ - токовая чувствительность, $S_v = U_\phi / \Phi$ - вольтовая чувствительность.

- **Порог чувствительности Φ_n** – величина минимального светового потока, регистрируемого фотодиодом, отнесённая к единице полосы рабочих частот.

- **Постоянная времени τ** , которая характеризует инерционность прибора, то есть его быстродействие.

Это время, в течение которого фототок фотодиода изменяется после освещения или после затемнения фотодиода в e раз по отношению к установленвшемуся значению.

Для фотодиодов с р-п-переходом она составляет $10^{-6} - 10^{-8}$ с.

- **Темновое сопротивление R_t** – сопротивление фотодиода в отсутствие освещения.
- **Спектральная характеристика** – зависимость фототока от длины волны λ падающего на фотодиод света. Для германиевых и кремниевых фотодиодов спектральные характеристики показаны на рис.8. Длина волны, на которую приходится максимальная чувствительность, у кремниевых фотодиодов примерно равна $\lambda_{\max} = 800 - 900$ нм, у германиевых фотодиодов находится при $\lambda_{\max} = 1500 - 1600$ нм.
- **Вольт-амперная характеристика** - зависимость светового тока от напряжения при постоянном световом потоке.
- **Световая характеристика** - зависимость фототока от освещённости.

Некоторые другие параметры приведены в таблице.

Таблица 1

Параметры	Фотодиоды			
	ФД-1	ФД-2	ФД-3	ФДК
Рабочее напряжение, в	15	30	10	20
Максимальное обратное напряжение, в	20	50	—	—
Темновой ток, мка	< 30	< 25	< 15	< 3
Интегральная чувствительность, ма/лм	> 20	10–20	> 20	> 3
Площадь светочувствительной поверхности, мм^2	5	1	2	2

4. Применение фотодиодов. Современные фотодиоды обладают наилучшим сочетанием основных параметров:

1. Высокая чувствительность к оптическим сигналам;
2. Высокое быстродействие;
3. Малое рабочее напряжение;
4. Линейная зависимость фототока от освещённости в широком диапазоне освещённостей;
5. Низкий уровень шумов;
6. Простота устройства.

Поэтому они широко применяются в устройствах автоматики, вычислительной и лазерной техники, волоконно-оптических линиях связи.

В повседневной жизни фотодиоды используются в таких приборах, как устройства чтения компакт-дисков, современные фотокамеры, различные сенсорные устройства. Например, инфракрасные фотодиоды применяются в пультах дистанционного управления, системах охраны, безопасности и автоматики.

Существуют рентгеновские фотодиоды, применяемые для регистрации ионизирующего излучения и частиц с высокой энергией. Одно из важных применений - в медицинских приборах, например в установках для проведения компьютерной томографии.

Выполнение работы

Задание 1. Измерение вольт-амперной характеристики фотодиода при отсутствии освещения (в темноте).

Снятие прямой ветви вольт-амперной характеристики.

1. Подготовьте в тетради таблицы 2 и 3 для записи результатов измерений.

Таблица 2,3

$U,$									
$I,$									

2. Соберите электрическую цепь, показанную на рис.7. Фотодиод включите в прямом (пропускном) направлении, обратив внимание на знаки + и -, указанные на его панели. Зарисуйте схему электрической цепи в тетради.

Источником тока в работе служит источник постоянного напряжения (ИН), имеющий на выходе регулируемое постоянное напряжение от 0 до 12 В. Напряжение на диод подается с потенциометра R и измеряется вольтметром, включенном на предел 2 В. Прямой ток измеряется цифровым мультиметром, включенном вначале на предел 20 мА, а затем на предел 200 мА.

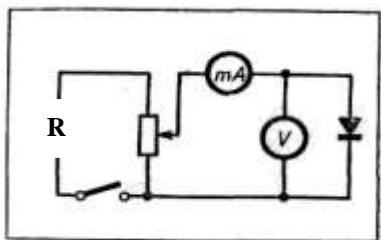


Рис. 7

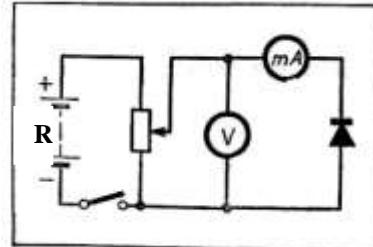


Рис. 8

3. Установите ручкой плавной регулировки источника тока напряжение, подаваемое на потенциометр R , 6 – 12 В. Напряжение на диод поступает с потенциометра R . Его величина зависит от величины выходного напряжения источника тока и положения подвижного контакта потенциометра. Перемещая подвижный контакт потенциометра и при необходимости регулятор напряжения источника тока, увеличивайте прямое напряжение на диоде от нуля до 0,4 В с шагом примерно 0,02 - 0,04 В. Запишите показания обоих приборов, то есть значения силы тока I и напряжения U , в таблицу 1. Сила тока при увеличении напряжения на диоде будет постепенно, а затем резко возрастать.

Внимание. Прямой ток диода не должен превышать 200 мА.

Снятие обратной ветви вольт-амперной характеристики.

1. Соберите электрическую цепь по новой схеме (рис.8), обратив внимание на отличие включения диода и вольтметра. Зарисуйте схему цепи в тетради.
2. Установите выходное напряжение источника тока 12 В, то есть максимальное значение. Напряжение на фотодиод поступает с потенциометра R и измеряется вольтметром, включенном на предел 20 В. Сила обратного тока измеряется цифровым мультиметром в режиме измерения постоянного тока на пределе 200 мА или 2000 мА.
3. Увеличивая обратное напряжение на диоде (с помощью потенциометра) от 0 до 12 В с шагом 0,5 – 1,0 В, измерьте величину обратного тока диода. Результаты измерений запишите в таблицу 2.
4. Используя результаты измерений, постройте график вольт-амперной характеристики фотодиода.

Прямой ток и прямое напряжение считайте положительными величинами, а обратный ток и обратное напряжение - отрицательными.

Задание 2. Измерение вольт-амперной характеристики фотодиода при освещении лампой накаливания.

1. Уберите экран, закрывающий фотодиод. Включите осветитель.
2. По методике, описанной в задании 1, с помощью измерительного стенда измерьте вольт-амперную характеристику фотодиода при освещении, соответствующем фототоку короткого замыкания 200 – 300 мА. Результаты измерений занесите в заранее подготовленные таблицы.
3. По результатам измерений постройте график вольт-амперной характеристики фотодиода при освещении.
4. Измерьте напряжение холостого хода U_{xx} и фотокороткого замыкания фотодиода.
5. Сравните графики вольт-амперных характеристик неосвещённого фотодиода (в темноте) и при освещении. Сделайте вывод о характере влияния освещения на обратный ток фотодиода.

Задание 3. Получение с помощью фотодиода осциллограммы переменного светового потока.

1. Соберите электрическую схему, предназначенную для преобразования с помощью фотодиода переменного светового потока в электрический сигнал (рис.4)
2. Осветитель с лампой накаливания включите в сеть переменного напряжения (частота напряжения 50 Гц).
3. Подготовьте электронный осциллограф к получению осциллограммы.
4. Подключите кабель осциллографа к концам нагрузочного резистора R_h схемы (рис. 4) и с помощью ручек и переключателей, позволяющих изменять усиление, частоту горизонтальной развертки и уровень синхронизации, получите на экране неподвижную осциллограмму светового потока, падающего на фотодиод.
5. Определите по осциллограмме частоту падающего на фотодиод светового сигнала.
6. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Какое устройство называют фотодиодом? Условное обозначение фотодиода.
2. Принцип работы фотодиода с p-n-переходом.
3. Два режима работы фотодиода. Описать действие и нарисовать электрические схемы.
4. Вольт-амперная характеристика неосвещённого фотодиода.
5. Вольт-амперная характеристика освещённого фотодиода.
6. Что называется фототоком? Направление фототока. Чем определяется его величина?
7. Какие носители заряда, перемещаясь через p-n-переход фотодиода, образуют фототок?
8. Что такое напряжение холостого хода U_{xx} и ток короткого замыкания I_{kz} ?
9. Электрическая схема, применяемая для регистрации переменного оптического излучения, в которой применяется фотодиод, включенный в фотодиодном режиме.
10. Применение фотодиодов.

1.16 Лабораторная работа № ЛР-16(2 часа)

Тема: «Изучение светоизлучающих диодов»

1.16.1 Цель работы: Ознакомиться с принципом действия, устройством и основными параметрами светодиодов.

1.16.2 Задачи работы:

1. Ознакомиться с принципом действия, устройством и основными параметрами светодиодов.
2. Измерение параметров светодиодов.
3. Схема включения светодиода и расчёт необходимых параметров.

1.16.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. светодиоды разной цветности,
2. источник постоянного напряжения,
3. реостат (потенциометр),
4. выключатель,
5. блок резисторов,
6. два цифровых мультиметра,
7. соединительные провода.

1.16.4 Описание (ход) работы:

1. Изучить теоретическое введение и записать основные сведения о конструкции, принципе действия, свойствах и применении светодиодов

Светоизлучающий диод (или кратко – светодиод, СИД) представляет собой полупроводниковый диод с р-п переходом, излучающий свет при протекании через него тока в прямом направлении. Условное графическое обозначение светодиодов показано на рис.1, а внешний вид некоторых индикаторных светодиодов – на рис.2

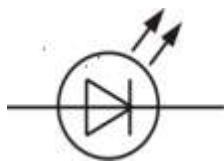


Рис.1



Рис. 2

Светодиоды являются источниками светового (некогерентного) излучения. По механизму действия они обратны фотодиодам. Такой прибор преобразует энергию электрического поля в нетепловое оптическое излучение, называемое электролюминесценцией.

Принцип действия – самопроизвольная излучательная рекомбинация неосновных носителей заряда (электронов и дырок) инжектированных (введенных) при протекании через р – п переход светодиода прямого тока.

Более подробно. В рабочем режиме к р-п переходу светодиода приложено внешнее напряжение не в запорном, а в прямом проводящем направлении. Внешнее напряжение понижает потенциальный барьер на границе р - и п – областей и создаёт условия для введения (инжекции) электронов в р- область и дырок в п- область. Через светодиод течёт ток. Дырки переходят в п- область, а электроны переходят в р – область, образуя избыточную концентрацию носителей заряда. Поэтому в прилежащих к переходу областях полупроводника происходит интенсивная рекомбинация электронов и дырок (электронно-дырочных пар) с выделением энергии либо в виде тепла, либо в виде излучения квантов света, фотонов.

Рекомбинация электрона и дырки – это воссоединение электрона и дырки, в результате которого электрон переходит в связанное состояние, электрон перестаёт быть свободным, а дырка исчезает. В свободном состоянии электрон обладает большей энергией, чем в связанном. Поэтому при рекомбинации электронно-дырочных пар разница энергий между этими состояниями ΔE выделяется в виде тепловой энергии или испускается в виде фотонов в окружающее пространство, то есть в виде света.

Первый процесс. Рекомбинация электронов и дырок, происходящая с выделением тепла, то есть с передачей энергии кристаллической решётке полупроводника, называется безызлучательной.

Второй процесс, когда происходит излучение света, называется излучательной рекомбинацией и является принципом действия светодиодов.

Для светодиодов характерны два механизма излучательной рекомбинации:

1. Межзонная (прямая) рекомбинация электронов и дырок.

В этом случае энергия испускаемого фотона $h\nu$ (она определяет частоту света, то есть цвет излучения светодиода) примерно равна ширине запрещённой зоны полупроводника E_g , из которого изготовлен светодиод.

2. Излучательная рекомбинация электронов и дырок с участием примесных атомов. В этом случае энергия излучаемых фотонов меньше ширины запрещённой зоны полупроводника $h\nu \square E_g$.

Цвет свечения светодиода зависит от длины (частоты) световых волн, испускаемых светодиодом. Частота ν (а стало быть и длина волны λ) излучения определяется энергией испускаемых фотонов $h\nu$, которая равна разности энергий состояний ΔE_p , между которыми происходит излучательный переход электрона (формула 1) и определяется исходным полупроводниковым материалом и легирующими примесями.

$$h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} = \Delta E_p \quad (1)$$

$$\text{Отсюда, частота излучения } \nu = \frac{\Delta E_p}{h}$$

$$\text{длина волны излучения } \lambda = \frac{hc}{\Delta E_p}$$

Путём подбора полупроводниковых материалов или добавляя специальные примеси, были получены светодиоды с разным цветом излучения (красного, зелёного, жёлтого,

оранжевого, синего цвета). Также разработаны и применяются светодиоды, излучающие инфракрасный свет и ультрафиолетовый свет.

Материалы для светодиодов. В производстве светодиодов в основном используются пять типов полупроводниковых соединений.

1. Арсенид галлия GaAs. Светодиоды из этого полупроводника испускают излучение в ближней инфракрасной области спектра (длина волны излучения $\lambda = 0,85 - 0,9$ мкм).

2. Фосфид галлия GaP – незаменимый материал для изготовления светодиодов зелёного цвета, широко применяется при создании «красных», «жёлтых», «оранжевых» светодиодов.

Светодиоды из этого полупроводника GaP:Zn,O, содержащего примеси цинка и кислорода, обладают красным свечением. Основное излучение этих диодов соответствует энергии фотонов $h\nu = 1,8$ эВ. Светодиоды из GaP с примесью азота дают зелёное свечение. Эти светодиоды широко применяются в качестве цифровых индикаторов.

3. Соединение арсенид-фосфид галлия GaAsP является важнейшим светодиодным материалом. Изменение процентного содержания фосфора в этом соединении позволяет получать любое свечение от зелёного до красного цвета при высокой яркости свечения.

4. Арсенид галлия-алюминия GaAlAs является материалом для создания инфракрасных излучателей, обладающих высоким быстродействием. Наиболее эффективные излучатели работают в спектральной области $\lambda_{изл} = 0,82 - 0,87$ мкм. Конкретное значение $\lambda_{изл}$ определяется условиями применения. Например, для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) оптимально излучение с $\lambda_{изл} = 0,825$ мкм.

5. Арсенид-фосфид индия-галлия InGaAsP - четырёхкомпонентное полупроводниковое соединение, состав которого можно изменять в широком интервале. Гетеросветодиоды на основе этого соединения обладают высокой мощностью излучения, быстродействием в более далёком ИК-диапазоне ($\lambda_{изл} = 1,3 - 1,6$ мкм), который оптимален для современных волоконно-оптических линий связи.

Разработаны и применяются на основе карбида кремния SiC светодиоды с жёлтым, зелёным и голубым свечением. Получены эффективные светодиоды из нитрида галлия GaN для всего видимого диапазона – в синей, зелёной, жёлтой и красной областях спектра, а также для ультрафиолетового излучения.

Конструкция светодиодов. Обычно светодиоды представляют собой полупроводниковый излучающий кристалл, находящийся в прозрачном или светорассеивающем корпусе, из которого выходят два соединительных проводника (рис. 3). Размеры корпуса составляют несколько миллиметров. Диаметр корпуса (колбы) широко применяемых светодиодов цилиндрической формы 3 мм; 5 мм; 8 мм; 10 мм. Материалом корпуса являются пластмасса, эпоксидная смола или легкоплавкое стекло.

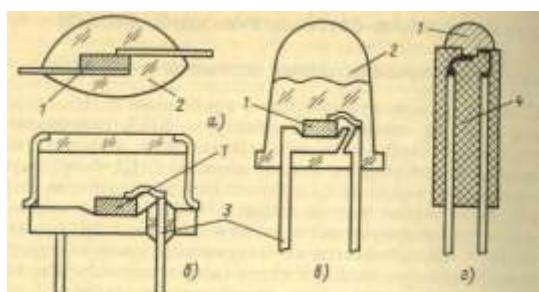


Рис.3.- Конструкции некоторых типов СИД:

светодиода в прозрачном корпусе.

а - бескорпусный; б – в металлокерамическом корпусе;

в – с полимерной линзой; г – в полимерном корпусе.

1 – кристалл, 2 – полимерная защита (линза),

3 – ножка, вывод, 4 – полимерный корпус.

Форма корпуса (верхняя часть в виде линзы), показатель преломления вещества корпуса, внутренние элементы (например, рефлектор) изготавливают такими, чтобы обеспечить наибольший выход света, излучаемого кристаллом, из корпуса наружу.

Это приводит к уменьшению потерь испускаемого света, обусловленных его поглощением и отражением внутри светодиода. Кроме того, обеспечивается определённая направленность излучения, то есть угол расхождения световых лучей.

Чтобы уменьшить потери света при отражении от поверхности самой излучающей структуры, излучающий элемент светодиода (полупроводниковый кристалл) иногда изготавливают не плоским (не в виде маленькой, тонкой, плоской пластинки), а виде полусферы, параболоида, усечённого эллипсоида и меза-структуры.

Плоская конструкция излучающего кристалла получила широкое распространение благодаря простоте и низкой стоимости и используется в самых массовых изделиях оптоэлектроники: индикаторах и оптопарах. Некоторые конструкции светодиодов показаны на рис.3

Производят также светодиоды, которые содержат внутри корпуса два, три или даже четыре полупроводниковых кристалла, излучающих свет разного цвета. Фактически, это несколько светодиодов разного цвета в одном корпусе.

Можно отметить RGB - светодиод, который представляет собой три близко расположенных светодиода разного цвета под одной линзой: красный светодиод – red, зелёный светодиод – green и голубой светодиод – blue. Яркость свечения светодиода зависит от величины протекающего через него тока. Поэтому, изменяя ток через эти разные светодиоды, тем самым смешивая три разных по цвету световых потока, можно получить любой другой цвет.

Существуют белые светодиоды, выполненные на основе кристалла с p – n переходом, излучающего голубой свет. Люминофор, находящийся внутри корпуса светодиода, преобразует голубое свечение в белый, то есть в свет с широким спектральным составом.

Параметры светодиодов.

1. Сила света I - световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении; выражается в кандалах, кд (мкд, мккд).
2. Цвет свечения или длина волн излучения, на которую приходится максимальная интенсивность (мощность) излучения - λ_{\max}
3. Рабочее напряжение U_p - постоянное падение напряжения (прямое) на светодиоде при протекании через него рабочего тока.
4. Рабочий ток I_p – номинальный прямой ток светодиода
5. Максимально допустимый прямой ток $I_{pr.\max}$.
6. Максимально допустимое обратное напряжение светодиода $U_{обр.\max}$
7. Максимально допустимое импульсное обратное напряжение $U_{обр.имп.}$

8. Максимально допустимая температура корпуса светодиода $T_{k, \max}$.
9. Угол излучения θ - плоский угол, в пределах которого сила света составляет не менее половины ее максимального значения.

Параметры некоторых светодиодов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры некоторых инжекционных светодиодов

Тип индикатора	Материал	Цвет свечения	λ_{max} , мкм	Рабочее напряжение, В	Рабочий ток, мА	Сила света, мкд
АЛ102Б	GaP : Zn, O	Красный	0,69	2,8	10	0,1
АЛ102В	GaP : Zn	Зеленый	0,56—0,57	2,8	20	0,2
АЛ341Б	GaP : Zn, O	Красный	0,69—0,7	2,8	10	0,5—1,0
АЛ341Г	GaP : N	Зеленый	0,56—0,57	2,8	10	0,5—1,0
АЛ341Е	GaP : N	Желтый	0,58	2,8	10	1,5—1,0
АЛ336И	GaP : N	Зеленый	0,56—0,57	2,8	10	20—50
АЛ336Е	GaP : N	Желтый	0,58	2,8	10	10—20
АЛ336К	Ga _{0,7} Al _{0,3} As	Красный	0,66	2,0	10	40—100
АЛ307Б	GaAlAs	»	0,67	2,0	10	1,0
АЛ307Г	GaAlAs	Зеленый	0,56—0,57	2,5	20	1,0
АЛ307Е	GaAlAs	Желтый	0,56; 0,7	2,5	10	1,5
АЛ307Л	GaAlAs	Оранжевый	0,56; 0,7	2,5	10	1,5
КЛ101В	SiC	Желтый	0,59	5,5	40	0,02
АЛС342А	GaAs _{0,15} P _{0,85} : N	»	0,585	2,5—2,3	5	0,1—0,5
АЛС324А	GaAs _{0,6} P _{0,4}	Красный	0,65—0,66	1,7—2,5	5	0,1—0,5

Схема включения светодиода и расчёт необходимых параметров.

1. При включении светодиода в цепь, необходимо соблюдать полярность. Светодиод имеет два вывода, один из которых катодный («минус »), а другой вывод анодный («плюс »). Светодиод будет светиться только при прямом включении, как это показано на рис.4. При обратном включении светодиод светиться не будет. Более того, возможен выход светодиода из строя даже при малых допустимых значениях обратного напряжения.

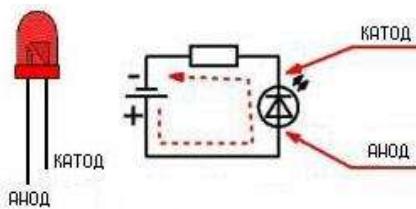


Рис.4 – Схема включения светодиода

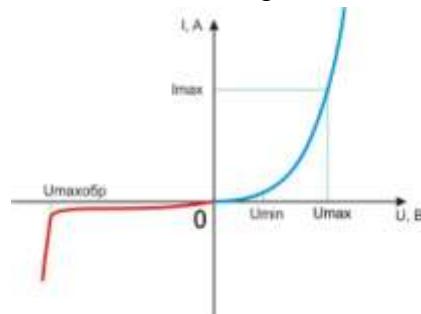


Рис.5– Вольт-амперная характеристика светодиода.

Вольт-амперная характеристика светодиода показана на рис.6. Видно, что каждому значению прямого напряжения соответствует своя величина силы тока. Чем большее напряжение, тем больше сила тока и тем ярче светится светодиод.

Для каждого светодиода существуют допустимые значения напряжения для прямого включения U_{\max} и напряжения для обратного включения $U_{\text{обр}, \max}$. При подаче

напряжений выше этих значений наступает электрический пробой, в результате которого светодиод выходит из строя. Эти напряжения составляют несколько вольт.

Существует и минимальное значение напряжения питания U_{\min} (напряжение зажигания U_z), при котором наблюдается свечение светодиода. Диапазон напряжений на светодиоде (прямое включение) между U_{\min} и U_{\max} называется "рабочей зоной", так как именно здесь обеспечивается работа светодиода.

2. Расчёт элементов схемы включения. Токоограничивающий резистор R .

Рабочее напряжение светодиода не является напряжением, которое нужно подать на него от источника постоянного тока. **Светодиод нельзя прямо подключать к источнику напряжения.** Совсем небольшое увеличение напряжения приведёт к заметному росту тока через светодиод и может привести к нагреву светодиода, изменению его параметров, уменьшению срока эксплуатации. Рабочее напряжение светодиода – это падение напряжение на светодиоде, возникающего при протекании через него номинального (рабочего) прямого тока. Рабочий режим светодиода определяется силой прямого тока.

Чтобы правильно подключить светодиод в самом простом случае, необходимо подключить его через токоограничивающий резистор R . Его включение ограничит силу тока через светодиод его номинальным, рабочим значением (рис.6).

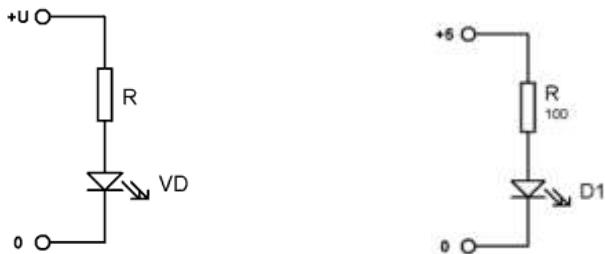


Рис. 6 – Схема включения светодиода. R – токоограничивающий резистор.

Пример расчёта токоограничивающего резистора. Имеется светодиод с рабочим напряжением 3 вольта и рабочим током 20 мА. Необходимо подключить его к источнику с напряжением 5 вольт. Рассчитаем сопротивление токоограничивающего резистора R .

$$R = U_{\text{гасящее}} / I_{\text{светодиода}} \text{ (по закону Ома для участка цепи)}$$

$$U_{\text{гасящее}} = U_{\text{питания}} - U_{\text{светодиода}}$$

$$U_{\text{питания}} = 5 \text{ В}$$

$$U_{\text{светодиода}} = 3 \text{ В}$$

$$I_{\text{светодиода}} = 20 \text{ мА} = 0.02 \text{ А}$$

$$R = (5 - 3) / 0.02 = 100 \text{ Ом} = 0.1 \text{ кОм}$$

В качестве токоограничивающего резистора надо взять резистор сопротивлением 100 Ом. Также надо учесть тепловую мощность, выделяемую при протекании тока через резистор, которая определяется по формуле $P = I^2 \cdot R = 0.02^2 \cdot 100 = 0.04 \text{ Вт}$. Очевидно, надо выбрать резистор, рассчитанный на 0,125 Вт или 0,25 Вт.

Применение светодиодов. Светодиоды видимого диапазона спектра широко применяют для устройств отображения информации, в качестве цифровых индикаторов в электронной аппаратуре, в дисплеях, калькуляторах, часах, мобильных телефонах и т.д.

Их используют для подсветки в корпусах компьютеров, для подсветки клавиатуры, куллеров, в автомобилях.

Мощные, суперяркие светодиоды применяют в осветительных устройствах для освещения помещений, в рекламе. В настоящее время светодиодные осветители постепенно заменяют традиционные осветители на лампах накаливания и газоразрядные источники света.

Инфракрасные светодиоды, излучающие свет в ближней инфракрасной области, применяют для оптической связи (в волоконно-оптических линиях связи), для дистанционного оптического управления (например, в пультах управления бытовой техникой), видеокамерах ночного видения, в качестве излучателей в оптранах (оптоэлектронных парах) и в оптических запоминающих устройствах.

Порядок выполнение заданий:

Задание 1. Измерить напряжение зажигания светодиодов разной цветности и установить зависимость яркости свечения от силы прямого тока.

- Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 7. С помощью потенциометра установить напряжение на светодиоде, равным нулю.
- Подготовить мультиметры к измерениям, установив один (для измерения силы постоянного тока) в положение 20 мА, а другой мультиметр (для измерения напряжения на светодиоде) – в положение 20 В. Включить источник постоянного напряжения и замкнуть цепь.
- Медленно увеличивая ручкой потенциометра напряжение на светодиоде, зафиксировать напряжение, при котором светодиод начинает светиться. Это напряжение часто называют напряжением зажигания U_3 . Записать это значение в таблицу 2.
- Продолжая увеличивать напряжение на светодиоде и наблюдая за его яркостью, отметить характер изменения яркости свечения светодиода с ростом силы тока.
- Подобным образом измерить напряжения зажигания других светодиодов.

Задание 2. Измерить падение напряжения (рабочее напряжение U_p) на светодиоде при номинальной силе прямого тока (рабочий ток светодиода).

- Установить ручкой потенциометра напряжение на светодиоде, равным нулю.
- Включить источник постоянного напряжения и замкнуть цепь.
- Ручкой потенциометра установить силу прямого тока $I = 10$ мА.
- С помощью вольтметра измерить падение напряжения U_p на светодиоде. Записать показания в таблицу 2.
- Подобным образом измерить падение напряжения U_p на других светодиодах.

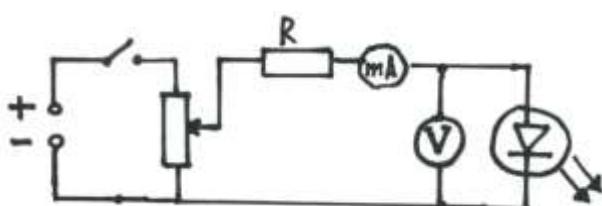


Рис. 7 – Измерительная схема

Таблица 2

Цвет излучения	Красный	Зелёный
Напряжения зажигания U_3 , В		
Прямое падение напряжения U_p , В		
Сила прямого тока I , мА		
Характер изменения яркости		

Контрольные вопросы

1. Что называют светодиодом? Его условное графическое обозначение.
2. Принцип действия светодиодов.
3. Чем обусловлен цвет излучения светодиода?
4. Из каких материалов изготавливают светодиоды?
5. Конструкция наиболее распространённых светодиодов.
6. Основные параметры светодиодов.
7. Применение светодиодов.
8. Схема включения светодиода. Для чего применяют токоограничивающий резистор?
9. Определите величину и мощность токоограничивающего резистора для простой схемы включения светодиода. Напряжение источника тока U_n и тип светодиода (из таблицы 2) укажет преподаватель.
10. Что такая рабочая зона светодиода?

1.17 Лабораторная работа № ЛР-17 (2 часа)

Тема: «Фотоэлектрический метод преобразования солнечного света»

1.17.1 Цель работы: Ознакомиться с фотоэлектрическим методом преобразования энергии солнечного света в электрическую энергию.

1.17.2 Задачи работы:

1. Некоторые величины, характеризующие солнечное излучение
2. Ознакомиться с фотоэлектрическим методом преобразования энергии солнечного света в электрическую энергию.

1.17.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Учебная солнечная батарея и солнечные фотопреобразователи;
2. Осветитель;
3. Микровентилятор;
4. Звуковой сигнализатор;
5. Блок светодиодный;

6. Цифровой мультиметр;
7. Соединительные провода;

1.17.4 Описание (ход) работы:

1. Изучить теоретическое введение и записать определения основных величин, характеризующих солнечное излучение.

Светом или оптическим излучением называются электромагнитные волны (электромагнитное излучение), у которых длина волны в вакууме λ занимает диапазон от 10 нм до 1 мм. Этот спектральный диапазон делят на три области.

Для Земли примерное расстояние до Солнца составляет $150 \cdot 10^6$ км и средняя плотность лучистой энергии на земной орбите, у границы земной атмосферы, равняется $\Phi_0 = 1370 \text{ Вт}/\text{м}^2$. **Эта величина называется солнечной постоянной.**

Некоторые величины, характеризующие солнечное излучение

1. **Энергия излучения** (волн) часто обозначается буквами W или Q_e и измеряется в джоулях (Дж).

2. **Поток излучения** Φ_e – величина, равная энергии электромагнитного излучения, проходящего в единицу времени через некоторую поверхность S .

Φ_e представляет собой мощность излучения, излучаемого телом и распространяющегося в пространстве. Единица измерения – ватт (Вт). Определяется как отношение энергии излучения W ко времени t , за которое излучение произошло.

$$\Phi = W / t \quad (2)$$

3. **Энергетическая освещённость (облучённость)** E_e – величина, которая характеризует величину потока излучения, падающего на единицу площади освещаемой поверхности. Единица измерения – $1 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Освещённость поверхности зависит от угла падения α . При нормальном падении потока излучения Φ_0 на поверхность S она определяется как отношение этих величин.

$$E_0 = \Phi_0 / S \quad (3)$$

При наклонном падении (рис.1) на ту же самую поверхность S освещённость E этой поверхности меньше и определяется выражением

$$E = E_0 \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

где E_0 – освещённость при нормальном падении излучения (света),

α – угол падения, то есть угол между направлением распространения излучения и нормалью к поверхности.

Это означает, что при освещении земной поверхности солнечным светом, количество солнечной энергии падающей (поступающей) на неё зависит от угла наклона солнечных лучей. В соответствии с (4) поток солнечного излучения Φ , падающего на поверхность площадью S , определяется выражением

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \cos \alpha = E_0 \cdot S \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

Тогда энергия солнечного света, поступающая на эту поверхность за время t , равна

$$W = \Phi_0 \cdot t \cdot \cos \alpha = E_0 \cdot S \cdot t \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

4. Солнечная инсоляция. Количество попадающего на освещаемую поверхность потенциально полезного солнечного излучения определяется понятием, именуемым **инсоляцией**. Обозначим её здесь, как W_s .

Солнечная инсоляция W_s – это суммарная энергия солнечного излучения, попадающего на единицу площади горизонтальной поверхности, определённая за достаточно длительный период времени (сутки, неделя, месяц, год). Единица измерения – 1 кВт·час/м².

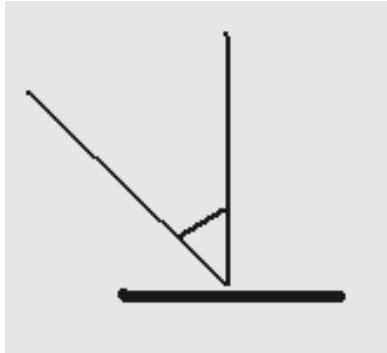


Рис. 1

Наклонное падение света

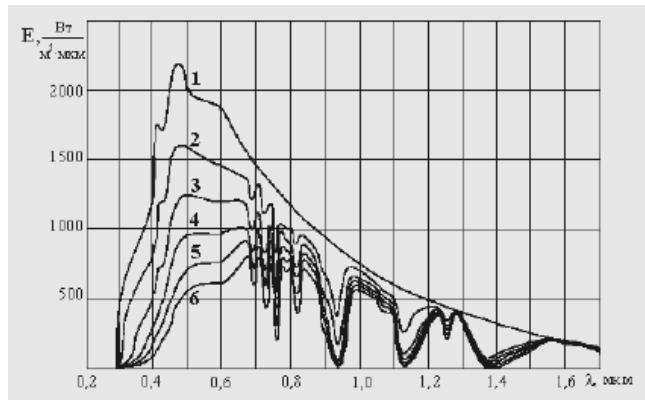


Рис.2 – Спектральное распределение энергии солнечного излучения вне земной атмосферы (1) и на поверхности земли для различных положений Солнца над горизонтом (2,3,4,5,6). 1 мкм = 1000 нм.

Солнечная инсоляция сильно изменяется от одной точки земной поверхности к другой, то есть зависит от географического положения местности. Очевидно, что степи Астрахани, пустыня Сахара получают значительно больше света, чем Петрозаводск или Санкт-Петербург.

При нахождении величины солнечной инсоляции какого-либо района необходимо учитывать также несколько факторов:

- влияние времени года, обуславливающее более низкую освещенность и долготу дня зимой;
- характер местности, освещаемой солнцем (наличие загораживающих солнце деталей рельефа местности, такие как горы, деревья, здания);
- местные погодные условия (облачность, туман, дождь);

Годовая солнечная инсоляция одного квадратного метра горизонтальной площадки в разных городах России (в МВт·час/м²)

Архангельск - 0.85

Омск - 1.26

Новосибирск - 1.14

Ростов на Дону - 1.29

Петербург - 0.93

Москва - 1.01

Екатеринбург - 1.1

Астрахань - 1.38

5. Спектр солнечного излучения (или спектральное распределение) – это зависимость мощности (или плотности потока излучения) солнечного излучения от длины волны λ .

Плотность потока излучения – это мощность электромагнитного излучения, проходящего через единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно направлению распространения электромагнитной волны

$$\Phi_e / S = W / S \cdot t$$

Солнечный свет представляет собой непрерывный набор электромагнитных волн с разной длиной волны или разной частоты. Интенсивность этих волн в солнечном спектре разная. Спектр солнечного излучения представлен на рис. 2. Солнечный спектр вне земной атмосферы примерно соответствует спектру излучения абсолютно чёрного тела с температурой 5800 К (кривая 1 на рис.2) и имеет максимум при $\lambda = 555 - 560$ нм.

Спектр солнечного излучения, наблюдаемый на Земле, заметно изменён (кривая 2 на рис.2). При прохождении через атмосферу солнечный свет ослабляется в основном благодаря поглощению инфракрасного излучения парами воды, поглощению ультрафиолетового излучения озоном (O_3) и рассеянию излучения находящимися в воздухе частицами пыли и аэрозолями.

Показатель атмосферного влияния на интенсивность солнечного излучения, доходящего до земной поверхности, определяется “атмосферной массой” (AM). “Атмосферная масса” для любого уровня земной поверхности в любой момент дня

$$AM = \frac{y}{y_0} \cdot \frac{1}{\sin \vartheta} \quad (7)$$

определяется по формуле

где y – атмосферное давление, y_0 – нормальное атмосферное давление (101.3 кПа), ϑ – угол высоты Солнца над горизонтом земного шара (рисунок 3).

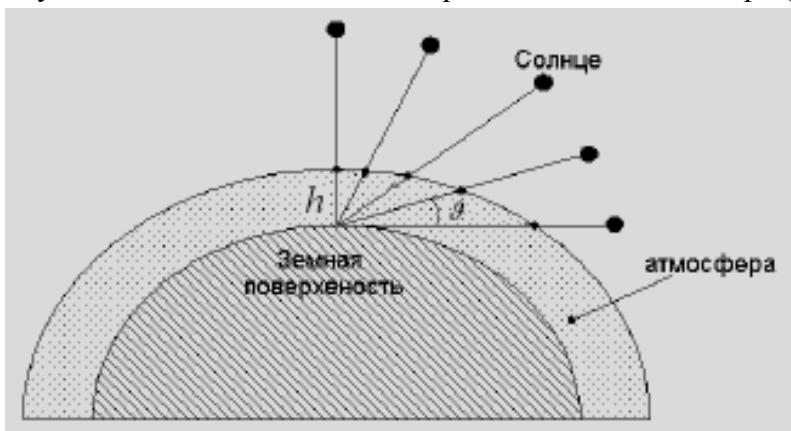


Рис. 3 – Расстояние, проходимое в атмосфере солнечными лучами при различных положениях Солнца над горизонтом, которое характеризуется углом ϑ .

II. Фотоэлектрический метод преобразования солнечной энергии

Фотопреобразователем солнечной энергии (ФЭП) называется полупроводниковое устройство, которое позволяет превращать энергию солнечного излучения непосредственно в электроэнергию, минуя стадии тепловой и механической форм энергии.

Другие, часто применяемые названия этих устройств: фотоэлемент, солнечный фотоэлемент, солнечный элемент (от solar cell).

Работа солнечного фотопреобразователя основана на внутреннем фотоэффекте в полупроводниковой структуре, содержащей внутреннее электрическое поле (например, электронно-дырочный переход). Другое, более раннее название процессов при фотопреобразовании – вентильный фотоэффект.

Солнечный ФЭП наиболее простой конструкции представляет собой полупроводниковый кристалл, состоящий из двух слоев (областей) с различным типом проводимости (электронный – n, дырочный – p). Конструкция солнечного ФЭП на р-п – переходе показана на рис. 4.

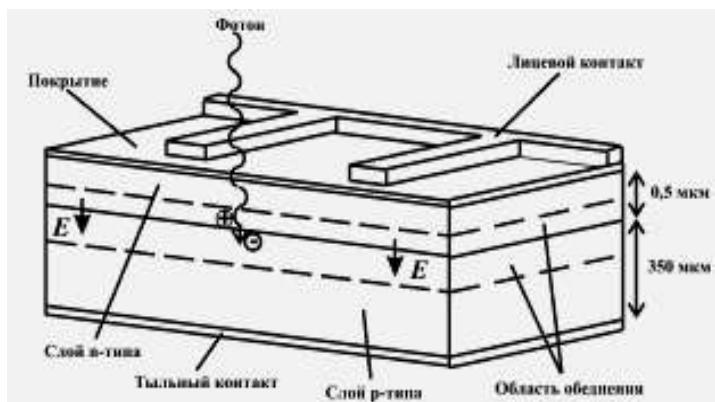


Рис. 4 - Схема кремниевого монокристаллического солнечного элемента (ФЭП). Слой р-типа имеет толщину 0,35 мм, р-п-переход залегает на глубине 0,5 мкм от верхней освещаемой поверхности, лицевой и тыльный контакты-металлические токоотводы, пунктиром обозначена область обеднения(или запирающий слой).

Принципиальную роль играет встроенное электрическое поле, которое возникает вблизи границы раздела р- и n- областей полупроводника и выделено на рис. 4 пунктиром. Электроны, перешедшие из n-области в p-область, рекомбинируют с дырками вблизи границы раздела. Аналогично рекомбинируют дырки, перейдя из p-области в n- область. В результате вблизи р-п-перехода практически не остается свободных носителей заряда (электронов и дырок).

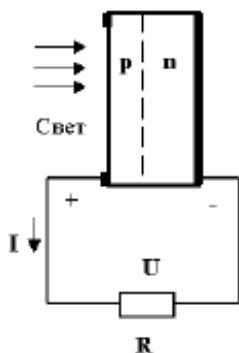


Рис.5 – Схема ФЭП, соединённого с нагрузкой (R). Показаны полярность напряжения и направление тока.

Принцип действия ФЭП. Оптическое (солнечное) излучение, поглощаемое в полупроводниковой структуре с р-п-переходом, создает свободные пары “электрон-дырка” при условии, что энергия фотона $h\nu$ превышает ширину запрещенной зоны полупроводника E_g .

Свободные электроны и дырки возникают как в p- и n- областях перехода, так и в непосредственной близости к запирающему слою.

Существующее в запирающем слое электрическое поле разделяет созданные светом свободные носители заряда в зависимости от их знака: свободные электроны перемещаются в n-область перехода, а дырки перемещаются в p- область, что приводит к зарядению этих областей.

При разомкнутой внешней цепи (ФЭП не подключен к нагрузке) электроны и дырки, концентрирующиеся соответственно в n- и p- областях, приводят к разности потенциалов, смещающей p-n переход в прямом направлении. Если же ФЭП подключен к внешней электрической цепи, то создаваемые при освещении избыточные электроны и дырки приведут к возникновению во внешней цепи электрического тока.

Разделение зарядов встроенным электрическим полем характеризуют электродвижущей силой, называемой фотоэдс, а ток во внешней цепи называют фототоком.

Таким образом, во время освещения ФЭП происходит преобразование энергии квантов света (фотонов) в энергию движущих во внешней цепи электрических зарядов.

Схема освещённого ФЭП, соединённого с внешней цепью (нагрузкой R) показана на рис.5. Показаны полярность напряжения и направление тока, текущего (при освещении) во внешней цепи от p-области к n-области.

Эффективность преобразования (к.п.д.) фотопреобразователя.

Важнейшая характеристика ФЭП – это коэффициент полезного действия η , который определяет эффективность преобразования солнечного излучения в электрическую энергию.

К.п.д. фотопреобразователя η называют отношение максимальной электрической мощности P_m , выделяемой при освещении в нагрузке, к потоку Φ падающего солнечного излучения, то есть к мощности солнечного излучения.

Обычно к.п.д выражают в процентах. Большинство промышленных солнечных фотопреобразователей изготавливают из монокристаллического и поликристаллического кремния. К.п.д. современных кремниевых ФЭП составляет примерно 14 - 18 %.

Для создания энергетических устройств с нужными характеристиками (напряжение, сила тока, мощность) солнечные ФЭП-ы соединяют в солнечные батареи, применяя последовательное, параллельное или последовательно-параллельное соединения.

Выполнение заданий

1. Подключив поочерёдно к освещённой батарее микровентилятор, звуковой сигнализатор, светодиодный блок, понаблюдайте за их работой. Отметьте, в какие формы энергии переходит энергия света.
2. Определите количество ФЭП, образующих солнечную батарею, и способ их соединения.
3. С помощью цифрового мультиметра определите:
 - полярность выходных контактов,
 - величину фотоэдс и фототока короткого замыкания при расстоянии до осветителя 30 см.

4. Увеличивая расстояние между солнечной батареей и осветителем, установите (качественную) зависимость фотоэдс и фототока от освещённости. Дайте объяснение этим зависимостям.
5. Освещая батарею солнечным светом и светом осветителя, сравните значения напряжения холостого хода и фототока короткого замыкания.

Контрольные вопросы

1. Что такое свет или оптическое излучение?
2. Что называется инфракрасным, видимым и ультрафиолетовым светом?
3. Что называется солнечной постоянной и чему она равна (для Земли)?
4. Величины, характеризующие солнечное излучение (поток излучения, освещённость, солнечная инсоляция).
5. От чего зависит солнечная инсоляция?
6. Что называют фотопреобразователем солнечной энергии?
7. Устройство солнечного фотопреобразователя с р-п- переходом.
8. Принцип действия ФЭП.
9. К.п.д. фотопреобразователя солнечной энергии.
10. Основный полупроводник, применяемый для промышленного производства фотопреобразователей и солнечных батарей, и к.п.д. промышленных фотопреобразователей.

1.18 Лабораторная работа № ЛР-18 (2 часа)

Тема: «Измерение нагрузочной вольт-амперной характеристики солнечной батареи»

1.18.1 Цель работы: изучение устройства и работы солнечных фотопреобразователей.

1.18.2 Задачи работы:

1. Ознакомиться с конструкцией и работой кремниевого солнечного фотопреобразователя.
2. Измерение нагрузочной вольт-амперной характеристики солнечной батареи.
3. Определение параметров солнечной батареи.

1.18.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Кремниевая солнечная батарея;
2. Осветитель;
3. Цифровые мультиметры;
4. Магазин сопротивлений;
5. Соединительные провода.

1.18.4 Описание (ход) работы:

1. Ознакомиться с конструкцией и работой кремниевого солнечного фотопреобразователя.

Солнечные фотопреобразователи (ФЭП) представляют собой полупроводниковые фотоэлектрические устройства, предназначенные для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую.

Другие, часто применяемые названия этих устройств: фотоэлемент, солнечный фотоэлемент, солнечный элемент (от solar cell).

Работа солнечного фотопреобразователя основана на внутреннем фотоэффекте в полупроводниковой структуре, содержащей внутреннее электрическое поле (например, за счёт создания электронно-дырочного перехода). Другое название - вентильный фотоэффект или фотовольтаический эффект.

Конструкция. Солнечный фотопреобразователь типичной, классической конструкции содержит p-n переход и представляет собой тонкую полупроводниковую пластину, состоящую из двух слоев (областей) с различным типом проводимости (электронный – n, дырочный – p). Структура солнечного кремниевого ФЭП с p-n –переходом показана на рис. 1, а условное обозначение - на рис.2

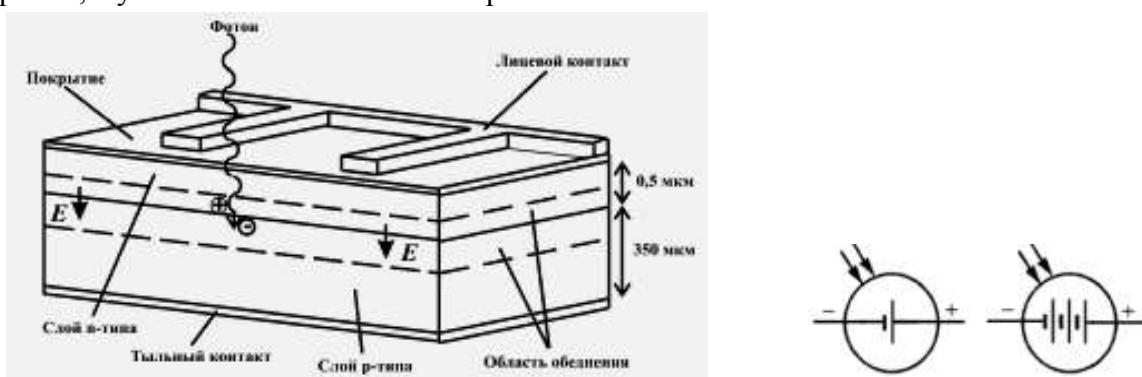


Рис.- 2

Рис. 1 – Структура кремниевого солнечного элемента (ФЭП).

Базовый слой p-типа имеет толщину 0,35 мм, p-n-переход залегает на глубине 0,5 мкм от верхней освещаемой поверхности, лицевой и тыльный контакты - металлические токоотводы, пунктиром обозначена область обеднения, то есть запирающий слой. Покрытие – антиотражающее покрытие из оксида кремния SiO_x , TiO_2 или Ta_2O_5 , которое уменьшает потери, вызванные отражением света от фронтальной поверхности.

Рис.2 – Условное обозначение солнечного фотопреобразователя и солнечной батареи.

Принцип действия ФЭП. Солнечное излучение, поглощаемое в полупроводниковой структуре с p-n-переходом, создает свободные пары “электрон-дырка” при условии, что энергия фотона $h\nu$ превышает ширину запрещенной зоны полупроводника E_g .

Свободные электроны и дырки возникают как в p- и n- областях перехода, так и в непосредственной близости к запирающему слою. Существующее в запирающем слое сильное электрическое поле разделяет созданные светом свободные носители заряда в зависимости от их знака: свободные электроны перемещаются в n-область, а дырки перемещаются в p- область, что приводит к зарядению этих областей.

При разомкнутой внешней цепи (ФЭП не подключен к нагрузке) электроны и дырки, концентрирующиеся соответственно в n- и p- областях, приводят к разности потенциалов, смещающей p-n переход в прямом направлении. Если же ФЭП подключен к внешней электрической цепи, то создаваемые при освещении избыточные электроны и дырки приведут к возникновению во внешней цепи электрического тока.

Разделение зарядов встроенным электрическим полем характеризуют электродвижущей силой, называемой фотоэдс, а ток во внешней цепи называют фототоком.

Таким образом, во время освещения ФЭП происходит преобразование энергии квантов света (фотонов) в энергию движущих во внешней цепи электрических зарядов.

Схема освещённого ФЭП, соединённого с внешней цепью (нагрузкой R) показана на рис.3. Показаны полярность напряжения и направление тока, текущего при освещении во внешней цепи от p-области к n-области. Направление фототока совпадает с направлением слабого обратного тока, текущего при подаче обратного напряжения.

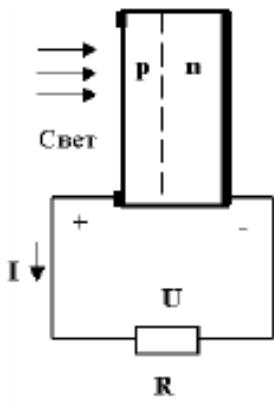


Рис. 3 - Схема ФЭП, соединённого с нагрузкой R . Показаны полярность и направление тока.

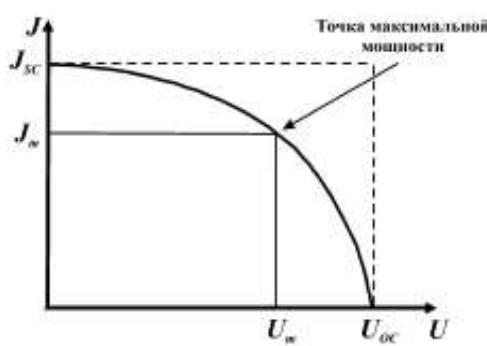


Рис. 4 - Нагрузочная вольт-амперная характеристика солнечного фотопреобразователя при освещении.

I V. Основные параметры. Солнечные фотопреобразователи работают только в фотовентильном режиме, то есть в качестве генераторов тока, электрических батарей или других подобных источников питания. Основными параметрами ФЭП являются:

1. P_{max} - максимальная электрическая мощность, отдаваемая в нагрузку при освещении;
2. η (к.п.д.) - отношение максимальной электрической мощности P_{max} , выделяемой при освещении в нагрузке, к потоку Φ падающего солнечного излучения, то есть к мощности солнечного излучения, падающего на поверхность ФЭПа.

$$\eta = P_{max} / \Phi = I_{max} \cdot U_{max} / \Phi \quad (1)$$

3. U_{xx} - напряжение холостого хода (фотоэдс или э.д.с. разомкнутой цепи);
4. I_{kz} - ток короткого замыкания (максимальный фототок);
5. f - коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики, который определяется выражением

$$f = P_{max} / I_{kz} \cdot U_{xx} \quad (2)$$

6. R_{nosl} - последовательное сопротивление.

Вольт-амперная характеристика. Важным показателем качества фотопреобразователя является нагрузочная вольт-амперная характеристика, приведенная на рис.4. Обычно её получают путём изменения величины сопротивления нагрузки, включенной

последовательно с освещённым фотопреобразователем или солнечной батареей по схеме, показанной на рис. 5. По оси ординат откладывается либо сила тока I , либо плотность тока J . По горизонтальной оси откладываются значения выходного напряжения ФЭП, то есть напряжение на нагрузке U . Указывается уровень освещённости.

Как видно, зависимость силы тока от напряжения является нелинейной. При большом сопротивлении нагрузки R тока в цепи практически нет и выходное напряжение равно напряжению холостого хода U_{xx} . При уменьшении сопротивления нагрузки напряжение немного падает, а сила тока растёт. Затем достигается такое положение, когда с уменьшением сопротивления R выходной ток освещённого ФЭПа практически более не увеличивается. А напряжение будет постоянно уменьшаться. Как только сопротивление нагрузки R станет равным нулю, выходное напряжение упадёт до нуля. Наступит состояние короткого замыкания фотопреобразователя, которое, однако, не приводит к его выходу из строя.

Характер вольт-амперной зависимости не зависит от уровня освещённости. На рис.6 показано семейство нагрузочных характеристик кремниевого фотопреобразователя при различной энергетической освещённости. Все графики имеют одинаковую форму.

Как видно из рис.4, электрическая мощность, выделяющаяся в нагрузке и определяемая произведением $P = I \cdot U$, на рисунке представляется площадью прямоугольника. Для одного и того же фотоэлемента и освещённости в зависимости от величины сопротивления R в нагрузке каждую секунду выделяется разное количество энергии.

При некотором значении R в нём выделяется наибольшее количество энергии. Эта нагрузка является оптимальной и отвечает наибольшему к.п.д. преобразования световой энергии в электрическую. На рис. 4 этот режим отмечен точкой на графике, которой соответствуют определённые значения тока и напряжения.

Мощность, выделяемая в этом режиме является максимальной (пиковой). Численно она равна площади максимального прямоугольника, ограниченного вольт-амперной характеристикой.

Из рисунка также видно, что максимальная возможная мощность будет тем больше, чем больше I_{kz} и U_{xx} , а также чем ближе форма нагрузочной кривой к прямоугольнику. Максимальную (пиковую) мощность можно представить в виде выражения (см. формулу 2):

$$P_{\max} = f \cdot I_{kz} \cdot U_{xx} \quad (3)$$

Величина f называется коэффициентом заполнения. Она показывает, какую часть площади от максимальной возможной при данных I_{kz} и U_{xx} (то есть при данном ФЭП и световом потоке) составляет площадь (прямоугольника), характеризующая мощность, снимаемую с фотопреобразователя. Величина f зависит от тока насыщения, фототока и сопротивления нагрузки R .

Используя коэффициент заполнения f к.п.д. преобразования можно выразить в виде:

$$\eta = I_{\max} \cdot U_{\max} / \Phi = f \cdot I_{kz} \cdot U_{xx} / \Phi \quad (4)$$

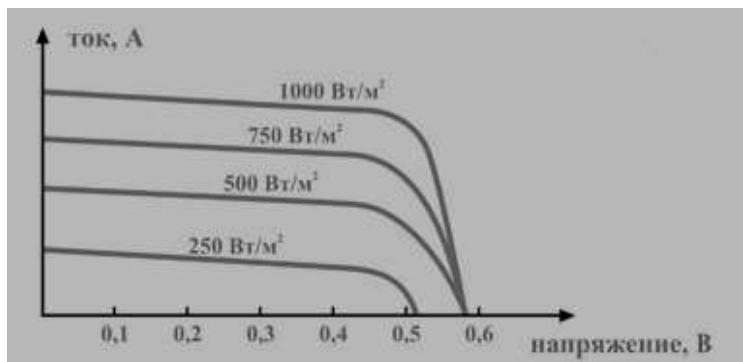


Рис.6 - Семейство нагрузочных характеристики кремниевого фотопреобразователя при различной освещённости.

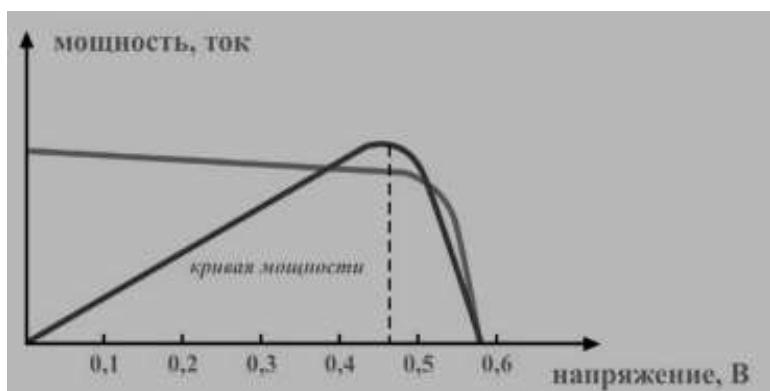


Рис.7 – График зависимости выходной мощности от напряжения для фотопреобразователя из кристаллического кремния.

Кривая мощности. Зависимость выходной мощности, выделяемой в нагрузке, от выходного напряжения на нагрузке показана рис.7. На кривой имеется лишь одна точка, которая соответствует максимальной или пиковой мощности, снимаемой с фотоэлемента.

У кремниевых фотопреобразователей выходное напряжение, которое соответствует пиковой мощности, равно 0,45 – 0,47 В. Фактическая получаемая мощность зависит от интенсивности падающего солнечного излучения и размеров фотопреобразователя.

Солнечные фотопреобразователи и солнечные батареи из кристаллического кремния.

Некоторые параметры современных промышленных образцов.

1. Напряжение холостого хода отдельного фотопреобразователя примерно $U_{xx} = 0,6$ в.
2. Плотность тока короткого замыкания (без учёта влияния атмосферы) $J_{k3} = 49,6$ мА/см².
3. Пиковая мощность соответствует напряжению около 0,47 В.
4. Коэффициент заполнения - до 0,82.
5. КПД обычного солнечного элемента в настоящее время колеблется в пределах 10-16 %. Это значит, что ФЭП размером 100 · 100 мм при стандартных условиях может

генерировать 1,0 - 1,6 Вт. Солнечные кремниевые фотопреобразователи с р-п переходом, имеющие некоторые конструктивные особенности, имеют к.п.д. от 16 до 19 %.

Для создания энергетических устройств с нужными характеристиками (напряжение, сила тока, мощность) солнечные ФЭП-ы соединяют в солнечные батареи, применяя последовательное, параллельное или последовательно-параллельное соединения. Вольт-амперная характеристика и кривая мощности солнечной батареи похожи на характеристики отдельных фотопреобразователей .

Стандартными условиями для паспортизации фотопреобразователей и солнечных батарей во всем мире следующие :

- энергетическая освещенность $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$
- температура 25°C
- спектр АМ 1,5 (солнечный спектр на широте 45°)

Выполнение заданий

Задание 1. Измерение нагрузочной вольт-амперной характеристики солнечной батареи.

1. Изучить и законспектировать теоретическое введение.
2. Ознакомиться с измерительной схемой (рис. 5) и зарисовать её.
3. Установить осветитель в положение, соответствующее освещённости E_1 .
4. Включить осветитель и измерительные приборы (мультиметры).
5. Установить сопротивление нагрузки R (магазин сопротивлений) в положение, соответствующее минимальному сопротивлению.
6. Изменяя сопротивление нагрузки R от минимального до максимального значений, занести показания вольтметра (напряжение на нагрузке U) и миллиамперметра (сила тока в нагрузке I) в таблицу 1.
7. Для всех снятых показаний по формуле $P = I \cdot U$ вычислить мощность P , выделяемую в нагрузке.
8. По полученным данным построить график нагрузочной вольт-амперной характеристики солнечной батареи .
9. Построить график зависимости мощности, отдаваемой солнечной батареей в нагрузку, от напряжения на нагрузке (кривая мощности).

Таблица 1

U ,									
I ,									
$P=I \cdot U$,									

Задание 2. Определение параметров солнечной батареи.

- Используя полученные данные, определить ток короткого замыкания I_{k3} и напряжение холостого хода U_{xx} .
- Используя табличные данные и зависимость мощности от напряжения, определите максимальную электрическую мощность, выделяемую в нагрузке, и напряжение, соответствующее максимальной мощности, для уровня освещённости E_1 .
- Используя график нагрузочной вольт-амперной характеристики солнечной батареи для освещённости E_1 , определите коэффициент заполнения f . Коэффициент заполнения определяется путём вычисления максимальной площади прямоугольника, ограниченного вольт-амперной характеристикой.
- Вычислите к.п.д. солнечной батареи, используя формулу (4), значение энергетической освещённости E_1 и площадь поверхности батареи S .

$$\eta = f \cdot I_{k3} \cdot U_{xx} / \Phi = f \cdot I_{k3} \cdot U_{xx} \cdot 100 \% / E_1 \cdot S \quad (5)$$

Контрольные вопросы

- Что называют фотопреобразователем солнечной энергии?
- Принцип действия солнечного фотопреобразователя.
- Из какого материала изготавливают промышленные солнечные батареи?
- Конструкция солнечного фотопреобразователя.
- Роль антиотражающего покрытия и металлических контактов.
- Основные параметры солнечного фотопреобразователя: P_{\max} , U_{xx} , I_{k3} , f , η (к.п.д.).
- Нагрузочная вольт-амперная характеристика. Как она выглядит?
- Что такое пиковая мощность?
- Параметры современных солнечных фотопреобразователей, изготовленных из кристаллического кремния.
- Что такое солнечная батарея?

1.19 Лабораторная работа № ЛР-19 (2 часа)

Тема: «Влияние на к.п.д. солнечной батареи температуры и уровня освещённости»

1.19.1 Цель работы: Изучить влияние температуры и уровня освещённости на к.п.д солнечной батареи.

1.19.2 Задачи работы:

- Измерение зависимостей I_{k3} и U_{xx} кремниевой солнечной батареи от температуры.
- Измерение зависимостей I_{k3} и U_{xx} кремниевой солнечной батареи от уровня освещённости.

1.19.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

- Кремниевая солнечная батарея;
- Осветитель;
- Цифровые мультиметры;

4. Термопара;
5. Оптическая скамья с осветителем;
6. Вентилятор или фен;
7. Соединительные провода.

1.19.4 Описание (ход) работы:

1. Изучить теоретическое введение и записать основные сведения. В общем случае вольт-амперная характеристика фотопреобразователя солнечной энергии с р-п-переходом выражается следующим уравнением:

$$I = I_n \cdot \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] - I_\phi , \quad (1)$$

где I_n - ток насыщения в темноте; I_ϕ - фототок, то есть ток, созданный возбуждёнными светом носителями заряда и проходящий через р-п-переход; U – напряжение на переходе, q – величина заряда носителей (элементарный заряд).

Если во внешней цепи сила тока $I = 0$ (цепь разомкнута), то из выражения (1) можно найти напряжение холостого хода U_{xx} .

$$U_{xx} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_\phi}{I_n} + 1\right) \quad (2)$$

Поскольку сила фототока обычно прямо пропорциональна световому потоку $I_\phi \sim \Phi$, то из формулы (2) следует нелинейная зависимость напряжения холостого хода U_{xx} от светового потока Φ .

Если освещаемый фотопреобразователь включен во внешнюю цепь с малым сопротивлением (или сопротивление нагрузки $R_n = 0$), то напряжение $U = 0$. А поскольку напряжение отсутствует, то в цепи течёт ток $I = -I_\phi$, часто называемый током короткого замыкания I_{k3} . Знак минус означает, что ток в цепи течёт в том же направлении, что и при обратном (запирающем) напряжении.

Эффективность преобразования солнечной энергии фотопреобразователя характеризуют с помощью коэффициента полезного действия η .

К.п.д. фотопреобразователя η называют отношение максимальной электрической мощности P_{max} , выделяемой при освещении в нагрузке, к потоку Φ падающего солнечного излучения, то есть к мощности солнечного излучения, падающего на поверхность ФЭПа.

$$\eta = P_{max} / \Phi = I_{max} \cdot U_{max} / \Phi$$

Используя другую характеристику фотопреобразователя f (коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики), к.п.д. можно выразить в следующем виде:

$$\eta = I_{max} \cdot U_{max} / \Phi = f \cdot I_{k3} \cdot U_{xx} / \Phi \quad (3)$$

Влияние на к.п.д. фотопреобразователя температуры и уровня освещённости

Эффективность фотопреобразователя определяется рядом физических процессов, основными из которых являются:

1. Поглощение света, которое сопровождается образованием электронно-дырочных пар и появлением избыточных носителей заряда;

- Процессы диффузии фотогенерированных носителей заряда;
- Процессы рекомбинации (воссоединения) электронов и дырок, образованных светом.

В эффективных солнечных фотопреобразователях основная доля избыточных носителей заряда должна диффундировать к области перехода, где происходит их разделение электрическим полем перехода. Важное влияние также оказывает последовательное сопротивление, создаваемое металлической контактной сеткой фотоэлемента.

Эти процессы в той или иной степени зависят от температуры, при которой находится фотопреобразователь, и уровня его освещённости. Например, на рис.1 показана вольт-амперная характеристика фотопреобразователя при температурах 25°C и 60°C, которые заметно отличаются друг от друга.

Математическое описание зависимости фотоактивных процессов в фотопреобразователе от температуры и освещённости часто является сложным и не всегда позволяет проанализировать происходящие физические процессы. Поэтому при изучении температурной зависимости к.п.д. фотопреобразования солнечной энергии обычно рассматривают температурные зависимости величин, определяющих его (формула 3): ток короткого замыкания I_{kz} , напряжение холостого хода U_{xx} и коэффициент заполнения f .

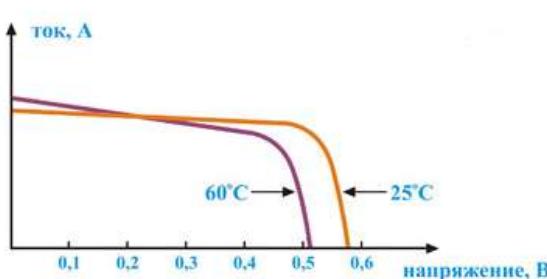


Рис. 1

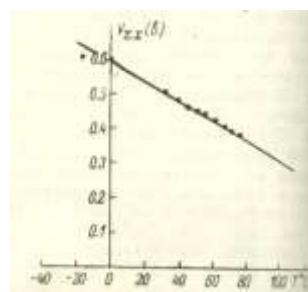


Рис.2 – Зависимость напряжения холостого хода U_{xx} от температуры кремниевого фотоэлемента.

Зависимость тока короткого замыкания I_{kz} от температуры обусловлена главным образом диффузией неосновных носителей заряда, условия и параметры которой изменяются с изменением температуры. Небольшое увеличение I_{kz} с ростом температуры также вызвано изменением поглощения света.

Согласно экспериментальным данным у большинства высококачественных кремниевых солнечных фотоэлементов I_{kz} почти постоянен и немножко возрастает при повышении температуры. Поэтому зависимость выходной мощности от температуры в основном определяется зависимостью U_{xx} от температуры. Определённый вклад даёт и коэффициент заполнения f .

Зависимость U_{xx} и f от температуры в основном вызвана изменением концентрации собственных носителей заряда, что при повышении температуры приводит к уменьшению U_{xx} и f . Для напряжения холостого хода температурная зависимость показана на рис.2. Эта зависимость хорошо согласуется с теоретической, полученной из формулы (3) $dU_{xx}/dT = 0,00288 \text{ В/}^{\circ}\text{C}$, что отвечает примерно 0,5 % на 1 °C.

Коэффициент полезного действия преобразования фотопреобразователя с *p-n* переходом на основе кремния, определяемый с помощью формулы (3), достигает

максимального значения при температурах от -150°C до -100°C . При температуре, близкой к 25°C , к.п.д. изменяется со скоростью, равной примерно $d\eta/dT = -0,05\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При работе фотопреобразователей в условиях низкой температуры возможно значительное уменьшение диффузионной длины и, следовательно, I_{kz} . Кроме того при низких температурах металлические контакты могут утратить свои омические свойства, что приведёт к существенному уменьшению коэффициенту заполнения f . В современных кремниевых солнечных элементах последняя проблема в значительно мере устранена.

Влияние уровня освещённости на к.п.д. фотопреобразователя

При эксплуатации солнечных батарей следует учитывать, особенности их работы при повышенной освещённости. В этом случае используют величину – коэффициент концентрации солнечного излучения C , определяемый как отношение плотности потока солнечного излучения, падающего на поверхность солнечной батареи, к освещённости $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ или $100 \text{ мВт}/\text{см}^2$. Высокая освещённость солнечных фотопреобразователей, вплоть до $C = 10^2 - 10^3$, создаётся путём применения зеркал большой площади, например сферических зеркал. Эти зеркала вместе с механизмом слежения за положением Солнца, образуют концентрирующую систему. Применение недорогих солнечных фотопреобразователей с солнечными концентраторами может оказаться экономически оправданным.

При небольшой освещённости, когда $C < 1$, зависимости U_{xx} и I_{kz} от освещённости солнечного света, падающего на кремниевый фотоэлемент, имеют вид, показанный на рис.3.

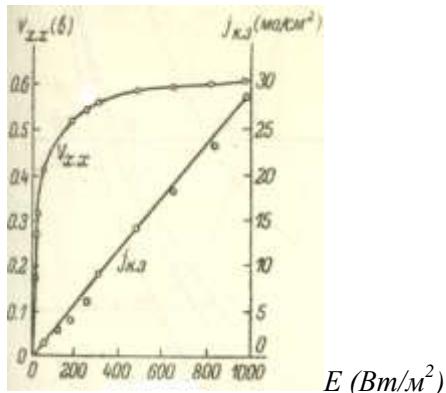


Рис.3 – Опытные зависимости напряжения холостого хода U_{xx} и плотности тока короткого замыкания J_{kz} от освещённости солнечного света.

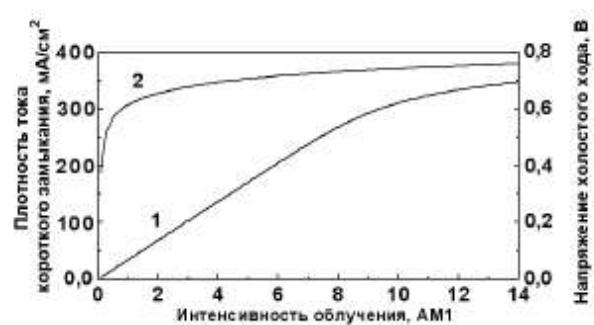


Рис.4 – Расчётные зависимости U_{xx} (2) и J_{kz} (1) от освещённости солнечного света.

Из рисунка видно, что I_{kz} пропорционален освещённости солнечного света (нижняя зависимость), а U_{xx} довольно быстро достигает значения $0,5 - 0,6 \text{ В}$ и в интервале от 200 до $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ мало изменяется.

Однако при высоких уровнях освещённости возникают эффекты, влияющие на эффективность преобразования и вызванные не только нагреванием:

1. Концентрация фотогенерированных носителей заряда начинает зависеть от плотности потока фотонов, что приводит к сверхлинейной зависимости фотока от потока фотонов;
2. Уменьшается напряжение в обеднённом слое в области $p-n$, которое становится заметным при высоких значениях U_{xx} .

3. Влияние ненулевого последовательного сопротивления R_{nosl} фотоэлемента на коэффициент заполнения f становится более существенным по сравнению с воздействием сопутствующего повышения температуры. Возникают значительные потери мощности.

Поэтому для того, чтобы потери мощности при высокой освещённости были незначительны, нужно обеспечить его малое значение за счёт создания контактной сетки специальной формы с близко расположеными полосами и низким сопротивлением контактов. У фотоэлементов, которые предполагается использовать при концентрации солнечного излучения $C = 10^3$, такие контакты создать трудно.

Тем не менее при наличии хорошего теплоотвода и оптимальной конструкции контактной сетки к.п.д. фотопреобразователя η возрастает почти по логарифмическому закону по мере повышения освещённости до тех пор, пока под влияние высокой концентрации фотогенерированных носителей заряда и потеря на последовательном сопротивлении при увеличении C не начнётся насыщение или спад к.п.д.

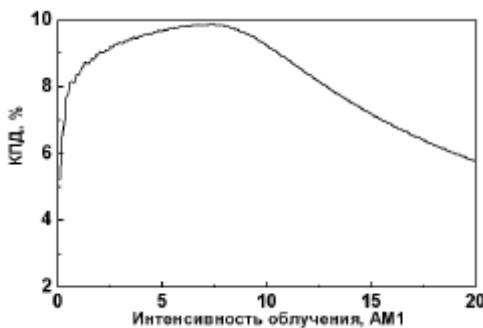


Рис.5 – Расчётная зависимость к.п.д. фотопреобразователя с $p - n$ переходом от уровня освещённости.

На рис. 4 и 5 по оси абсцисс отложены значения интенсивности облучения, которые соответствуют энергетической освещённости фотопреобразователя, поделённой на освещённость $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$. AM1 означает условия измерения характеристик фотоэлемента, когда он находится на поверхности Земли, а Солнце – в зените. Непосредственно зависимость эффективности фотопреобразователя (к.п.д.) от освещённости представлена на рис.5.

Выполнение заданий

Задание 1. Измерение зависимостей I_{kz} и U_{xx} кремниевой солнечной батареи от температуры.

1. Изучить теоретическое введение, ознакомиться с измерительной схемой и зарисовать её электрическую схему и таблицу 1 для записи результатов измерений .
2. Включить осветитель. При освещении солнечной батареи она будет нагреваться от комнатной температуры до температуры $85^\circ - 90^\circ\text{C}$. Количество измерений 14 - 15.

По мере нагревания батареи следует измерять U_{xx} и I_{kz} через каждые 5°C и записывать их в таблицу 1, вплоть до максимального значения температуры.

3. Не выключая осветитель, включить воздушный вентилятор для охлаждения солнечной батареи до температуры $30^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}$. Проследить за изменениями напряжения холостого хода и тока короткого замыкания. Отметить характер изменений этих характеристик.
4. Выключить осветитель и вентилятор.

5. Считая коэффициент заполнения солнечной батареи постоянным и равным $f = 0,55$, освещённость $E = 60 \text{ мВт/см}^2$ и площадь освещаемой поверхности $S = 34 \text{ см}^2$ рассчитайте по формуле (3) для каждой температуры к.п.д. батареи (в процентах).
6. По результатам измерений постройте графики зависимостей напряжения холостого хода U_{xx} , тока короткого замыкания I_{kz} и к.п.д. η от температуры t .
7. Рассчитайте на сколько в среднем (вольт или милливольт) уменьшается U_{xx} батареи при увеличении её температуры на 1°C ?
8. Сделайте вывод о характере изменений параметров солнечной батареи при изменении её температуры.

Задание 2. Измерение зависимостей I_{kz} и U_{xx} кремниевой солнечной батареи от уровня освещённости.

1. Установить солнечную батарею на оптическую скамью напротив осветителя в первое наиболее удалённое от осветителя положение.
2. Перемещая солнечную батарею к осветителю измерить значения U_{xx} и I_{kz} для каждого положения и вместе с данными освещённости E занести их в таблицу 2.
3. Используя результаты измерений, построить графики зависимостей U_{xx} и I_{kz} от уровня освещённости батареи.
4. Сделайте вывод.

Таблица 1

$t, {}^\circ\text{C}$															
$U_{xx}, \text{ В}$															
$I_{kz}, \text{ мА}$															
$\eta, \%$															

Таблица 2

Освещённость $E, \text{ лк}$					
$U_{xx}, \text{ В}$					
$I_{kz}, \text{ мА}$					

Контрольные вопросы

1. Вольт-амперная характеристика фотопреобразователя с $p-n$ переходом.
2. Что называют напряжением холостого хода, током короткого замыкания?

3. Можно ли осуществлять короткое замыкание ФЭПа без вреда для него?
4. Выражение для напряжения холостого хода.
5. Что такое к.п.д. фотопреобразователя? Формула к.п.д.
6. Как зависят I_{k3} , U_{xx} и к.п.д. фотопреобразователя от температуры?
7. Как зависят I_{k3} , U_{xx} и к.п.д. фотопреобразователя от уровня освещённости?
8. Что такое коэффициент концентрации солнечного излучения?
9. Каким образом можно сконцентрировать солнечное излучение на поверхность фотопреобразователя? Причины применения энергетических гелиосистем, состоящих из солнечной батареи и концентратора солнечного излучения?
10. Как зависит I_{k3} и U_{xx} от размеров солнечного фотопреобразователя?

1.20 Лабораторная работа № ЛР-20 (2 часа)

Тема: «Спектральная чувствительность солнечного фотопреобразователя»

1.20.1 Цель работы: : Измерение спектральной чувствительности полупроводникового фотопреобразователя солнечной энергии.

1.20.2 Задачи работы:

1. Измерение спектральной чувствительности полупроводникового фотопреобразователя солнечной энергии.

1.20.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. фрагмент промышленного солнечного фотопреобразователя, изготовленного из поликристаллического кремния,
2. спектрометр СФ-46,
3. цифровой вольтметр,
4. соединительные провода.

1.20.4 Описание (ход) работы:

1. Изучить теоретическое введение и записать основные необходимые сведения.

1. Солнечное излучение. Естественным источником света (электромагнитного излучения) для Земли является Солнце, которое поставляет Земле в виде электромагнитного излучения огромную мощность , равную около $2 \cdot 10^{17}$ Вт, постоянно освещая обращённую к Солнцу сторону нашей планеты. Интенсивность солнечного света на уровне моря в южных широтах, когда Солнце в зените, составляет порядка $1 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Основная часть этой энергии испускается в виде электромагнитного излучения в диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного. Примерно 99 % энергии излучения Солнца приходится на интервал длин волн $100 - 4000$ нм. А общая мощность Q , излучаемая Солнцем в окружающее пространство, составляет $3.8 \cdot 10^{26}$ Вт.

Для Земли примерное расстояние до Солнца составляет $150 \cdot 10^6$ км и средняя плотность лучистой энергии на земной орбите, у границы земной атмосферы , равняется $\Phi_0 = 1370 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Эта величина называется солнечной постоянной.

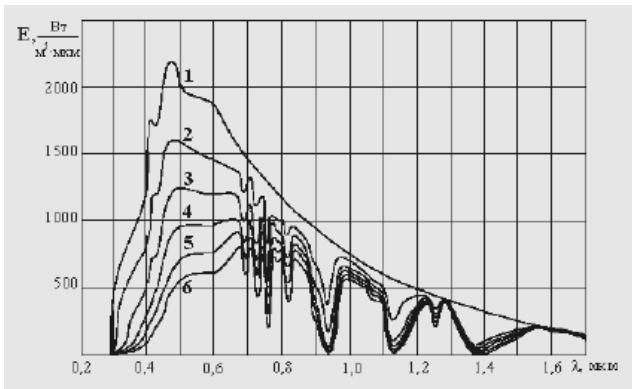


Рис.2 – Спектральное распределение энергии солнечного излучения вне земной атмосферы (1) и на поверхности земли для различных положений Солнца над горизонтом (2,3,4,5,6). 1 мкм = 1000 нм.

Солнечный свет представляет собой непрерывный набор электромагнитных волн с разной длиной волны или разной частоты. Интенсивность этих волн в солнечном излучении разная. Распределение энергии солнечного света характеризуется его спектром, который показан на рис.2.

Спектр солнечного излучения (или спектральное распределение) – это зависимость мощности (или плотности потока излучения) солнечного излучения от длины волны λ .

Напоминание. Плотность потока излучения – это мощность электромагнитного излучения, проходящего через единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно направлению распространения электромагнитной волны

$$\Phi_e / S = W / S \cdot t$$

Солнечный спектр вне земной атмосферы примерно соответствует спектру излучения абсолютно чёрного тела с температурой 5800 К (кривая 1 на рис.2) и имеет максимум при $\lambda = 555 - 560$ нм

Спектр солнечного излучения, наблюдаемый на Земле, заметно изменён (кривая 2 на рис.2). При прохождении через атмосферу солнечный свет ослабляется в основном благодаря поглощению инфракрасного излученияарами воды, поглощению ультрафиолетового излучения озоном (O_3) и рассеянию излучения находящимися в воздухе частицами пыли и аэрозолями.

2. Фотоэлектрический метод преобразования солнечной энергии

Фотопреобразователем солнечной энергии (ФЭП) называется полупроводниковое устройство, которое позволяет превращать солнечный свет непосредственно в электрическую энергию.

Работа солнечного фотопреобразователя основана на внутреннем фотоэффекте в полупроводниковой структуре, содержащей внутреннее электрическое поле (например, электронно-дырочный переход).

Принцип действия ФЭП. Солнечное излучение, поглощаемое в полупроводниковой структуре с р-п-переходом, создает свободные пары “электрон-дырка” при условии, что энергия фотона $h\nu$ превышает ширину запрещенной зоны полупроводника E_g , то есть $h\nu \geq E_g$.

Ширина запрещённой зоны E_g – это энергетический параметр полупроводника, который определяет способность полупроводника поглощать свет с образованием свободных электронов и дырок (фотоактивное поглощение света).

При фотоактивном поглощении света свободные электроны и дырки возникают как в р- и н- областях перехода, так и в непосредственной близости к запирающему слою. Существующее в запирающем слое электрическое поле разделяет созданные светом свободные носители заряда в зависимости от их знака: свободные электроны перемещаются в н-область перехода, а дырки перемещаются в р- область, что приводит к зарядению этих областей и появлению напряжения между электродами ФЭПа.

Эффективность преобразования. Потери .

Однако, не всё солнечное излучение, падающее на фотопреобразователь, преобразуется в электрическую энергию, выделяющуюся в нагрузке. Значительная часть солнечной энергии теряется в результате ряда явлений, происходящих во время преобразования. Можно отметить несколько основных причин этих потерь.

1. Солнечный свет с энергией фотонов $h\nu \leq E_g$ не является фотоактивным и слабо поглощается полупроводником. Его поглощение приводит к нагреванию полупроводника, но не даёт вклад в создание фотоэдс.
2. Кроме того, световые волны с энергией фотонов $h\nu > E_g$, заметно превышающей E_g , также малоэффективны. Они сильно поглощаются вблизи поверхности полупроводника с образованием электронно-дырочных пар, которые быстро рекомбинируют (воссоединяются) за счёт различных дефектов и примесей на поверхности или у поверхности полупроводника.
3. Явлением, вызывающим потерю падающей энергии, является отражение солнечного излучения от поверхности полупроводника. Коэффициент отражения кристаллического кремния в видимой области составляет около 35 %.

Часть процессов, происходящих в фотопреобразователе, зависит от физических параметров полупроводника и конструкции ФЭПа и отражается в зависимости параметров (свойств, силы фототока, фотоэдс) фотопреобразователя от длины волны падающего солнечного света λ и характеризуется спектральной чувствительностью фотопреобразователя.

Спектральная чувствительность фотопреобразователя определяется как зависимость тока (фототока) короткого замыкания $I_{\text{кз}}$ фотопреобразователя , рассчитанного на единицу энергии падающего излучения.

Схема установки для измерения спектральной чувствительности солнечного фотопреобразователя приведена рис.2. Оптическая часть установки состоит из источника света (1) и монохроматора (2). В качестве источника света используется галогенная лампа, а в качестве монохроматора – оптическая часть спектрофотометра СФ-46. Для измерения силы тока или напряжения применяется цифровой вольтметр (6).

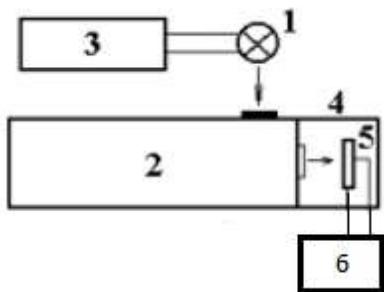


Рис.2 – Схема установки для измерения спектральной чувствительности ФЭП. 1 – лампа накаливания, 2- монохроматор спектрофотометра СФ-46, 3-блок питания источника света, 4- камера исследуемого образца, 5-исследуемый образец, 6-цифровой вольтметр.

Порядок выполнения задания

1. Включить блок питания осветителя, установить номинальный режим для источника света и подождать 5 минут.
2. После установки номинального режима для источника света на шкале длин волн монохроматора следует установить длину волны 650 нм и полностью открыть щель монохроматора.
3. Затем нужно расположить исследуемый образец в измерительной камере установки таким образом, чтобы световой пучок, выходящий из монохроматора, полностью освещал рабочую поверхность исследуемого образца.
4. Провести измерение спектра силы тока короткого в диапазоне длин волн 500 – 1200 нм. Для этого следует установить начальное значение длины волны $\lambda_0 = 500$ нм и измерить силу тока короткого замыкания $I_{кз}(\lambda_0)$ при максимальном значении ширины щели монохроматора.

После этого, оставляя щель монохроматора полностью открытой, установить новое значение длины волны на шкале монохроматора и вновь провести измерение силы тока короткого замыкания.

- Для удобства последующей обработки результатов измерения рекомендуется изменения длины волны излучения осуществлять с постоянным шагом $\Delta\lambda = 10$ нм
5. Для расчета спектральной чувствительности ФЭП полученные значения $I_{кз}$ следует разделить на число фотонов $N(\lambda)$, при котором получено измеренное значение тока короткого замыкания. Таблицу значений спектра $N(\lambda)$ получить у преподавателя (лаборанта).
 6. Результаты измерений силы тока короткого замыкания и вычислений спектральной чувствительности ФЭП представить в виде таблицы.
 7. Построить график спектральной чувствительности и определить длину волны λ_{\max} , соответствующую максимуму спектральной чувствительности .
 8. Сделать выводы о проделанной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют солнечным фотопреобразователем?
2. Какие эффекты лежат в основе принципа действия солнечного фотопреобразователя?
3. Дайте определение параметра солнечного ФЭП, характеризующего его эффективность преобразования.
4. От каких факторов зависит эффективность работы солнечного фотопреобразователя?
5. Как выглядит спектр солнечного излучения?
6. Что называется спектральной чувствительностью фотопреобразователя?
7. Схема установки для измерения спектральной чувствительности ФЭП и методика измерения.

1.21 Лабораторная работа № ЛР-21 (2 часа)

Тема: «Современные солнечные батареи»

1.21.1 Цель работы: Ознакомиться с устройством солнечных модулей и батарей наземного применения

1.21.2 Задачи работы:

1. Ознакомиться с устройством кремниевых солнечных модулей и батарей наземного применения.
2. Изучить особенности последовательного соединения солнечных фотопреобразователей и солнечных модулей.
3. Изучить особенности параллельного соединения солнечных фотопреобразователей и солнечных модулей.

1.21.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. солнечные модули (учебные),
2. цифровые мультиметры,
3. осветитель,
4. соединительные провода,
5. каркасный солнечный модуль,
6. измерительный стенд.

1.21.4 Описание (ход) работы:

1. Изучить теоретическое введение и записать основные необходимые сведения.

1. Фотоэлектрический преобразователь (ФЭП) солнечной энергии – полупроводниковый прибор (устройство), непосредственно преобразующее солнечный свет в электрическую энергию. Основа преобразования – вентильный или фотовольтаический эффект в полупроводниковой структуре.

В настоящее время более 90 % солнечных фотопреобразователей (солнечных элементов) и солнечных батарей наземного применения изготавливают из кристаллического и поликристаллического кремния.

Типичный кремниевый солнечный фотопреобразователь представляет собой тонкую пластину из кристаллического или поликристаллического кремния, в которой создан $p-n$ переход. На лицевую освещаемую поверхность нанесены антиотражающее (просветляющее) покрытие и металлическая токосъёмная контактная сетка, на обратную, тыльную поверхность – сплошной нижний (металлический) контакт (рис.1).

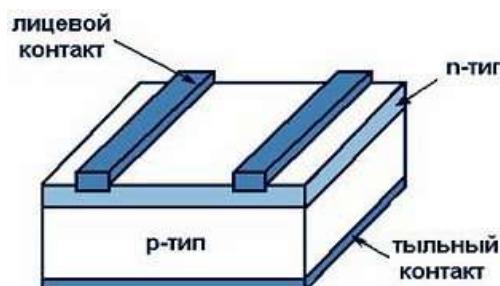


Рис.1 – Упрощённая конструкция солнечного элемента с $p-n$ переходом.

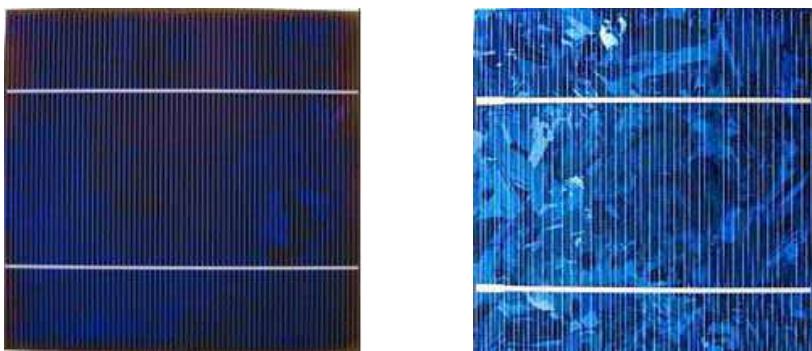


Рис.2 – Фотографии солнечных элементов из монокристаллического кремния (слева) и поликристаллического кремния.

В зависимости от типа проводимости более толстой базовой области различают солнечные элементы двух видов. Солнечные элементы с базой р -типа имеют фронтальную (лицевую) поверхность (сторону) в качестве отрицательного полюса, а тыльная сторона - это положительный контакт. Элементы с базой п- типа имеют тыльную сторону в качестве отрицательного контакта, а рабочую (лицевую сторону) в качестве положительного контакта. Солнечные элементы с базой р – типа гораздо более распространены. На фото (рис.2) показаны солнечные элементы из монокристаллического кремния (слева) и поликристаллического кремния (справа).

Некоторые характеристики промышленных кремниевых солнечных элементов приведены в таблице 1.

Таблица 1

РАЗМЕР, мм	ФОРМА	U _{xx} , В	I _{кз} , А	U _p , В	I _p , А	W _p , Вт
125·125	псевдоквадрат	0,595	5,31	0,470	4,71-5,11	2,21-2,41
62,5·62,5	1/4 от 125·125	0,595	1,35	0,470	1,05-1,30	0,55-0,60
125·62,5	1/2 от 125·125	0,595	2,65	0,470	2,10-2,65	1,10-1,20
103·103	псевдоквадрат	0,595	3,65	0,470	3,20-3,55	1,50-1,65

Здесь, U_p - напряжение максимальной мощности, иначе рабочее напряжение. При этом напряжении мощность, снимаемая с фотоэлемента или солнечного модуля достигает максимума;

I_p - рабочий ток или ток максимальной мощности. Протекает через фотоэлемент при напряжении максимальной мощности;

W_p - паспортная, максимальная электрическая мощность.

Толщина пластин - 180 – 200 мкм, а размеры стандартных солнечных элементов - 125×125 мм, 156×156 мм. Для производства маломощных солнечных модулей стандартные фотоэлементы режутся с помощью лазера на доли. Форма фотоэлементов – в виде псевдоквадрата (своегообразного восьмигранника с немного закругленными углами) или чистого квадрата/прямоугольника.

Напряжение холостого хода U_{xx} кремниевых фотопреобразователей не превышает 0,6 – 0,61 В и примерно одинаково у фотоэлементов разных изготовителей. С ростом температуры U_{xx} уменьшается примерно на 0,002 В при увеличении температуры на 1 °C выше 25°C.

Также и рабочее напряжение U_p , которое соответствует максимальной выходной мощности, у разных кремниевых фотоэлементов мало отличается друг от друга и составляет от 0,45 В до 0,49 – 0,5 В.

Сила фототока определяется размерами фотоэлементов и освещённостью, которую создаёт солнечный свет. Сила выходного тока также зависит от длины волны света, поскольку не все электроны падающего солнечного света при поглощении создают электронно-дырочные пары, а только те, у которых энергия равна или превышает ширину запрещённой зоны кремния $h\nu \geq E_g$. Для кристаллического кремния при комнатной температуре $E_g = 1,12$ эВ.

К.п.д. современных промышленных кремниевых фотопреобразователей наземного применения составляет от 14-15% до 18-19%.

Получены лабораторные образцы с заметно лучшими, почти теоретически предельными параметрами, и с к.п.д. 24 % и более.

Производителями солнечных элементов и батарей приняты определенные условия для тестирования и паспортизации этих устройств. Они называются стандартными (STC-Standart Test Condition) и включают три основных параметра:

- - освещенность 1000 Вт/м²;
- - температура 25°C;
- - спектр AM 1,5 (солнечный спектр на географической широте 45°).

Солнечная батарея, солнечный модуль, фотоэлектрический модуль представляют собой основные компоненты полупроводниковых энергетических установок, прямо преобразующих солнечный свет в электрическую энергию. Солнечные модули состоятся из солнечных фотопреобразователей, а солнечные батареи в свою очередь состоятся из солнечных модулей.

2. Способы соединения фотопреобразователей. Батареи можно составлять в любой желаемой комбинации. Простейшей батареей является цепочка из последовательно включённых фотоэлементов. На рис.3 представлены лишь три примера из возможных комбинаций. Различия в характере соединений, хотя все они обладают одинаковыми выходными характеристиками, обусловлены различными требованиями к надёжности.

На рис.3 (а) три последовательные цепочки фотоэлементов соединены параллельно. Такой способ используется, когда высока вероятность короткого замыкания отдельных элементов.

На рис.3 (б) представлена схема параллельно-последовательного соединения фотоэлементов. При таком соединении выход из строя одного элемента, например, из-за появления трещины, не приводит к потере целой цепочки вследствие разрыва цепи. В последнем примере на рис.3 (в) приняты во внимание оба случая с минимумом соединений. Возможны и другие типы соединений.

Количество последовательно спаиваемых фотоэлементов диктуется необходимым номинальным напряжением модуля. Солнечные модули с "номиналом" на 12В состоят из 36 солнечных элементов. Напряжение максимальной мощности 36-ти солнечных элементов даже с учетом потерь при нагреве модуля на солнце обеспечивает заряд 12-ти вольтового аккумулятора. Как известно, при нагреве модуля при реальной работе напряжение максимальной мощности постепенно уменьшается. Скорость снижения примерно составляет 0,002 В/°C на каждый фотоэлемент. Отсчет ведется от 25°C.

Существует важное условие. В одном солнечном модуле фотоэлементы должны иметь максимально близкие параметры, в противном случае один некачественный элемент

может испортить всю схему, так как через всю цепочку последовательно спаянных элементов ток будет протекать такой, как у наихудшего фотоэлемента.

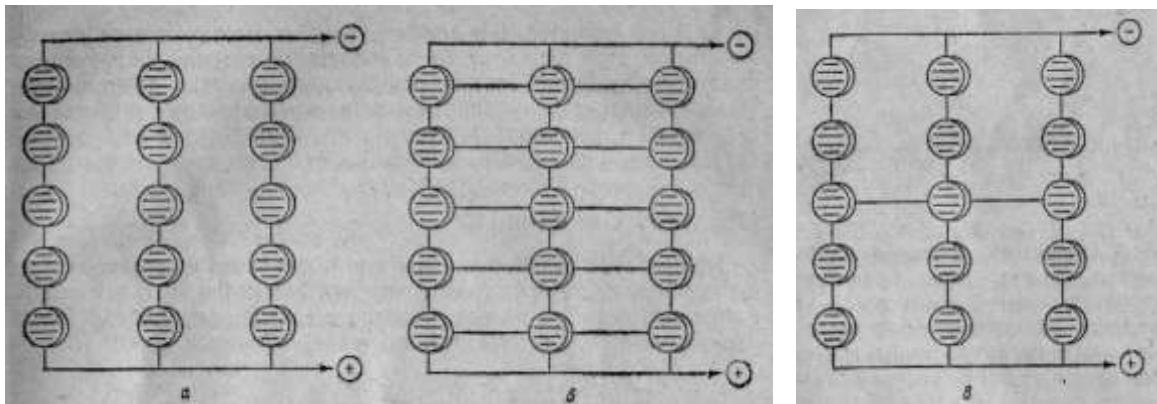


Рис.3

Чтобы увеличить мощность модуля необходимо параллельно соединить цепочки из последовательных солнечных элементов (способ на рис.3, б). К этому приходится прибегать, когда нужны модули определенной мощности, а коммутация маломощных модулей для достижения необходимой мощности нежелательна.

Модули со стандартным напряжением 24 В состоят из 72 последовательно соединенных фотоэлементов. В батареях для космоса подобный параллельно-последовательный тип сборки модуля из мелких солнечных элементов применяется для повышения надежности солнечной батареи в целом, так как в космосе она подвергается облучению («расстрелу») мелкими и более крупными быстрыми частицами и повреждение одной из параллельных цепочек не приведет к значительной потере мощности, как если бы вышла из строя одна цепочка из крупных фотоэлементов.

2. Герметизация солнечных батарей. Обычно осуществляется путём ламинирования. Подобный способ герметизации имеет несколько преимуществ. Во первых, солнечные элементы надежно фиксируются на защитном стекле. Во вторых, из за отсутствия воздушного зазора между покровным стеклом и элементами минимизируются потери на отражение, так как коэффициент преломления пленки ЭВА в кристаллизованном состоянии и коэффициент преломления стекла одинаковы. Соответственно нет ненужных потерь на отражение при переходе солнечного света из одной среды в другую. Для ламинирования применяется этиловинилацетатная (ЭВА) пленка, защитная пленка полиэтилентерефталат (ПЭТ) и закаленное стекло с текстурой, обладающее большей прозрачностью и низкими потерями на отражение под углами падения света менее 90°.

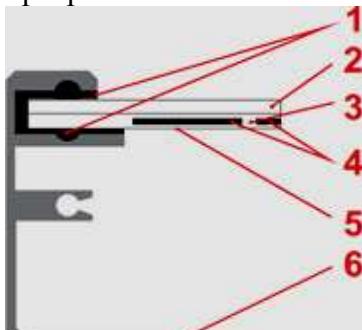


Рис. 4: 1 – герметик, 2 – стекло, 3 - герметизирующая пленка ЭВА, 4 – фотоэлементы, 5 - защитная пленка ПЭТ, 6 - алюминиевый каркас

Процесс ламинирования происходит в вакуумном ламинаторе при температуре 140 - 150°C. Перед этим собирается своеобразный сэндвич из стекла, двух слоев ЭВА между которыми находится электрическая схема из фотоэлементов и один слой защитной пленки

ПЭТ (рис.4). Под воздействием высокой температуры ЭВА расплывается, приобретает необходимую прозрачность и надежно спекается со стеклом и тыловой пленкой ПЭТ.

3. Затенение солнечных батарей. При работе с солнечными батареями сталкиваются с явлением, не имеющим места при использовании обычных источников питания. Это явление связано с так называемым *обратным смещением*.

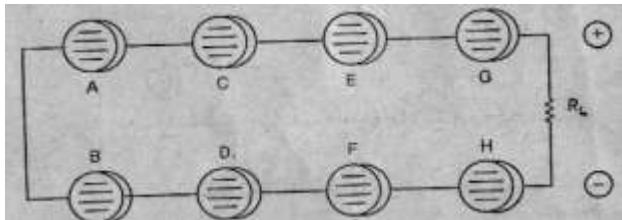


Рис. 5

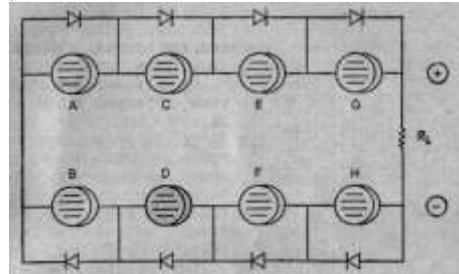


Рис. 6

Например, на рис.5 изображены 8 последовательно соединённых кремниевых фотоэлементов. Полное выходное напряжение цепочки при освещении всех фотоэлементов составляет 4 В (по 0,5 В от каждого элемента). В качестве нагрузки подключен резистор R_L . При затенении фотоэлемента D непрозрачным предметом он уже не производит электрический ток и представляет собой звено с большим внутренним сопротивлением, а не закоротку. Происходит то же, что и при размыкании выключателя, но этот выключатель (затемнённый фотоэлемент) разомкнут не полностью – через него течёт небольшой ток. В большинстве случаев эффективное сопротивление затемнённого фотоэлемента во много раз больше величины нагрузочного сопротивления R_L . Поэтому этот резистор можно рассматривать как кусок провода, соединяющий положительный и отрицательный выводы. Это означает, что функцию нагрузки выполняет элемент D . Остальные элементы снабжают энергией эту нагрузку. При большой мощности батареи, при ярком освещении ток через элемент D может быть значителен, он будет нагреваться и при достаточно сильном разогреве может выйти из строя. В результате вся батарея из последовательной цепочки элементов будет бездействовать.

Эффективное решение этой проблемы – параллельное подключение шунтирующих диодов ко всем солнечным элементам, как это показано на рис.6. Диоды подключены так, что при работе (освещении) солнечного элемента они обратно смещены напряжением самого элемента. Поэтому через диод ток не течёт, и батарея функционирует нормально.

При затенении, например, одного из элементов диод, подключенный к нему параллельно, оказывается прямо смещённым и через него течёт ток в нагрузку в обход затенённого фотоэлемента. Выходное напряжение всей цепочки при этом уменьшится на 0,5 В, зато устранился источник саморазрушения и батарея продолжает нормально работать. Без шунтирующих диодов она бы полностью вышла из строя.

На практике нецелесообразно шунтировать каждый элемент батареи. Как правило, исходя из разумного компромисса между надёжностью батареи и стоимостью, используют один диод для защиты 1/4 батареи. Таким образом, на всю батарею требуется 4 диода. В этом случае эффект затенения батареи будет приводить к 25 %, вполне допустимому, снижению выходной мощности батареи.

Поэтому обычно с тыльной стороны солнечного модуля устанавливается контактная коробка для электрических выводов модуля. Если мощность модуля более 60 Вт, то при сборке схемы делается 1 или 2 отвода - средние точки. Эти средние точки нужны для установки в контактной коробке шунтирующих диодов. Эти диоды уменьшают потери мощности от частичного затенения, а также предотвращают выход модуля из строя. Их называют **баррирующими диодами**.

Внешний вид стандартного солнечного модуля из 36 элементов показан на фотографии (рис.7). Для наращивания суммарной мощности солнечные модули соединяются в более

крупные массивы, которые называются солнечными батареями. Подобная модульность конструкций позволяет создавать системы неограниченной мощности.

4. Условия использования солнечных батарей.

- температурный диапазон – от - 50°C до +75°C
- диапазон атмосферного давления до 85 - 107 кПа
- относительная влажность 0 - 100%
- максимальная интенсивность дождя до 5 мм/мин
- максимальная нагрузка (снег + ветер) до 2000 Па

Выполнение заданий

Задание 1. Изучить последовательное соединение солнечных элементов и модулей.

1. Измерить напряжение холостого хода U_{xx} и ток короткого замыкания I_{kz} солнечных модулей.
2. Последовательно соединить несколько одинаковых по параметрам солнечных модулей.
3. При соединении модулей поэтапно, начиная с первого модуля, измерить напряжение холостого хода U_{xx} и ток короткого замыкания I_{kz} образующейся солнечной батареи.
Результаты измерений занести в таблицу 2.
4. Сделать вывод об особенностях последовательного соединения модулей.



Рис. 7 – Фотография солнечного модуля

Задание 2. Изучить особенности затенения солнечной батареи.

1. Измерить напряжение холостого хода U_{xx} и ток короткого замыкания I_{kz} солнечной батареи, состоящей из нескольких последовательно соединённых модулей.
2. Затемнить (закрыть от падающего света) один модуль солнечной батареи и измерить напряжение холостого хода U_{xx} и ток короткого замыкания I_{kz} батареи.
3. Сравнить значения U_{xx} и I_{kz} частично затенённой батареи с её начальными значениями, когда батарея освещалась полностью.
4. Сделать вывод о сопротивлении затенённого модуля и его влиянии на работу батареи.

Задание 3. Изучить параллельное соединение солнечных элементов и модулей.

1. Параллельно соединить несколько одинаковых по параметрам солнечных модулей.

- Измерить напряжение холостого хода U_{xx} и ток короткого замыкания I_{kz} образовавшейся солнечной батареи. Результаты измерений занести в таблицу 3.
- Сделать вывод об особенностях параллельного соединения модулей.

Таблица 2. Последовательное соединение солнечных модулей

<i>№ модуля</i>								
U_{xx}								
I_{kz}								

Таблица 3. Параллельное соединение солнечных модулей

<i>№ модуля</i>								
U_{xx}								
I_{kz}								

Контрольные вопросы

- Что называют солнечным элементом, солнечным модулем, солнечной батареей?
- Принцип работы фотопреобразователя солнечной энергии.
- Конструкция солнечного фотопреобразователя.
- Основные параметры современных кремниевых фотопреобразователей.
- Что называют напряжением холостого хода, током короткого замыкания, к.п.д.?
- Конструкция солнечных модулей и батарей.
- Способы и особенности соединения солнечных элементов в модули и батареи.
- Эффект затенения солнечного модуля или батареи. Способ защиты солнечной батареи.
- Устройство автономной фотоэлектрической станции (ФЭС). Функциональное назначение её элементов.
- Десять одинаковых солнечных фотопреобразователей (параметры в 1-ой строке таблицы 1) соединены последовательно. Определите U_{xx} , I_{kz} и напряжение полученной батареи при оптимальной нагрузке. Освещение и другие условия стандартные.

1.22 Лабораторная работа № ЛР-22 (2 часа)

Тема: «Солнечные фотоэлектрические системы (электростанции)»

1.22.1 Цель работы: Ознакомиться с устройством и работой сетевых солнечных фотоэлектростанций.

1.22.2 Задачи работы: Ознакомиться с устройством и работой сетевых солнечных фотоэлектростанций.

1.22.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Мультимедийный проектор;
2. Компьютер;
3. Солнечные батареи учебные.

1.22.4 Описание (ход) работы:

Изучить теоретическое введение и записать основные необходимые сведения.

1. Сетевые солнечные фотоэлектрические станции (ФЭС) - один из видов электростанций, генерирующий электричество путем преобразования солнечного излучения в электрическую энергию с последующей ее передачей в центральную электрическую сеть.

Сетевая станция представляет собой солнечный генератор без накопителя энергии. Основные элементы электростанций этого типа - солнечные панели и специальный сетевой инвертор. При этом крайне важно подбирать солнечные панели с одинаковыми характеристиками. В противном случае вся последовательная сеть будет работать по характеристикам панели с наихудшими параметрами.

В отличие от станций с накопителем возможности сетевых электростанций ограничены. Сетевая солнечная электростанция не может работать автономно. Поскольку накопителя электроэнергии нет, то в отсутствии солнечного света она не способна генерировать энергию. Поэтому в темное время суток и когда не хватает мощности электростанции, электричество берется из сети. Получается, что использование сетевой станции помогает существенно экономить расходы на электроэнергию. Однако, полностью отказаться от подключения к централизованной сети невозможно.

Структурная схема типовой сетевой солнечной электростанции показана на рис.1

В состав сетевой фотоэлектрической системы входят следующие элементы:

1. Солнечные батареи, вырабатывающие под действием солнечного излучения постоянный ток;
2. Сетевой инвертор, преобразующий постоянный ток , генерируемый солнечными панелями, в переменный ;
3. Система мониторинга, позволяющая отслеживать параметры работы солнечной электростанции;
4. Счетчики, предназначенные для мониторинга производительности системы и продажи электроэнергии по "зеленому" тарифу;
5. Поддерживающие металлоконструкции (опоры) для размещения солнечных батарей на земельном участке, крыше здания или подвижные поворотные трекеры;
6. Централизованная сеть - линия электропередач, к которой подсоединенна фотоэлектростанция;
7. Собственные потребители электроэнергии (промышленные или бытовые электроприборы).

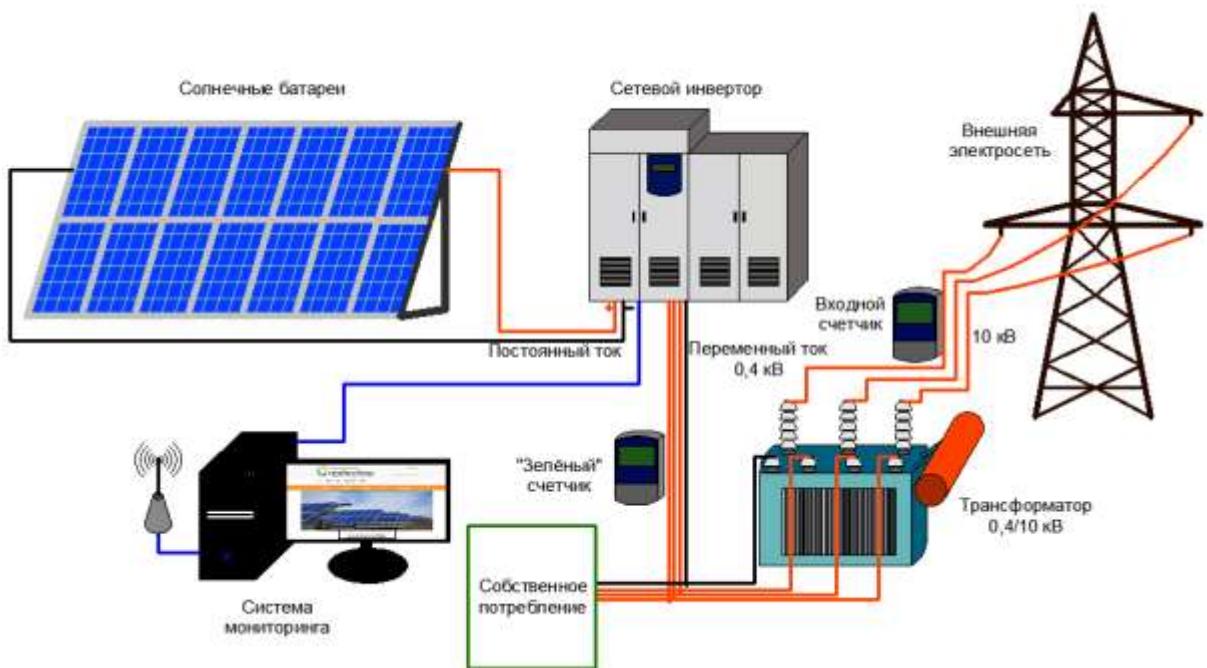
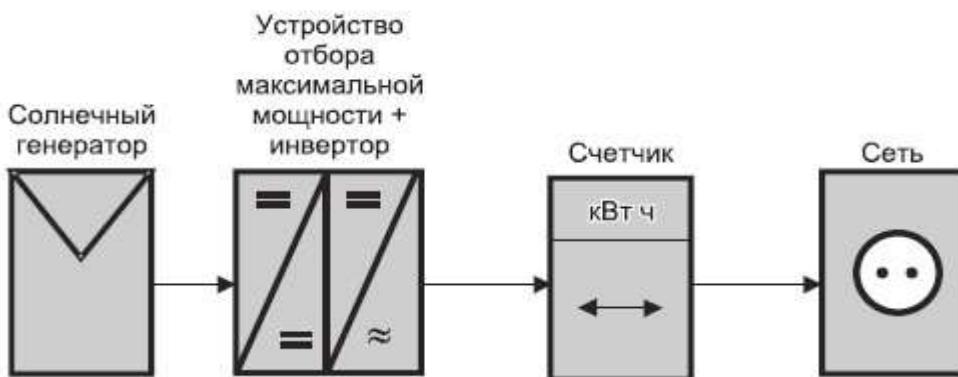


Рис. 1 - Структурная схема типовой сетевой солнечной электростанции (верхний рисунок) или в упрощённом виде (на нижнем рисунке).



Сетевые фотоэлектрические системы могут работать как по «зеленому» тарифу, продавая электроэнергию в централизованную внешнюю сеть, так и использоваться для производства электроэнергии с целью собственного потребления.

Преимущества сетевых солнечных электростанций:

- отсутствует необходимость использования любых видов ископаемого топлива.
- на протяжении всего срока эксплуатации генерируется значительно больше энергии, чем было затрачено для производства электростанции.
- для строительства подходят не только пустые площадки земли, но и крыши и фасады зданий, что позволяет экономить территорию и зачастую существенно снижает затраты на строительство.
- высокая надежность системы — в солнечной электростанции отсутствуют движущиеся части, которые шумят и изнашиваются.
- нет необходимости в проведении трудоемкого технического обслуживания для поддержки солнечной электростанции в работоспособном состоянии.
- возможность подключения по «зеленому» тарифу.
- возможность применения в местах, где отсутствуют централизованные электросети;
- возможность частичного или полного электропитания избранных потребителей;
- возможность дополнительной комплектации системы аккумуляторной батареей;
- экологическая безопасность работы;

- полностью автоматическая работа и изменение ее режимов;
- возможность применения трекерной системы слежения за Солнцем, которая позволяет удерживать солнечные модули в оптимальном положении относительно Солнца, максимально используя всю доступную солнечную энергию;
- срок эксплуатации фотоэлектростанции составляет не менее 25...30 лет. При этом снижение мощности, вызванное естественным старением электронных компонентов фотоэлектрической батареи, не превышает 20% после 25 лет эксплуатации ФЭС.

Строительство солнечных электростанций включает в себя:

- поиск и подбор земельных участков, зданий и других объектов для установки солнечных электростанций;
- прогноз эффективности проекта с учетом специфических территориальных условий;
- расчет стоимости солнечных электростанций;
- расчет окупаемости солнечных электростанций;
- системное проектирование солнечных электростанций и инжиниринг;
- подбор и закупка оборудования;
- монтаж и испытание систем - установка солнечных электростанций;

Сетевые солнечные электростанции, работающие по «зеленому» тарифу

В ряде развитых стран существует благоприятное законодательство (в виде различных льгот), стимулирующее строительство солнечных электростанций, работающих по «зеленому» тарифу, что делает строительство солнечных электростанций экономически привлекательным проектом. Существуют различные нормы для получения «зеленого» тарифа частными лицами (владельцами солнечных батарей) и для получения «зелёного» тарифа для энергообеспечения коммерческих промышленных объектов.



Рис. 2 – Солнечные панели (батареи) на фиксированных опорах

Установка солнечных батарей возможна:

- на фиксированных опорных металлоконструкциях для наземных и на крышных солнечных электростанций (рис.2);

- с помощью динамических систем крепления, позволяющих отслеживать суточных и сезонные перемещения Солнца (подвижные трекеры) (рис.3).

Трекер – подвижная платформа, поворачивающаяся вслед за перемещением Солнца по небу.

Солнечные батареи работают лучше всего тогда, когда рабочая поверхность фотоэлементов расположена перпендикулярно солнечным лучам. Применение трекерной системы слежения за Солнцем, которая позволяет удерживать солнечные модули в оптимальном положении относительно Солнца, максимально используя всю доступную солнечную энергию, приводит к увеличению ежегодного производства энергии на 25-30% по сравнению с неподвижно закрепленным солнечным модулем.

Применяются одноосные и двухосные трекеры, позволяющие повысить эффективность всей солнечной электростанции. Динамические системы крепления фотоэлектрических модулей (трекеры) снабжены системами управления, которые состоят из электромеханических приводов, блока управления и программного обеспечения.



Рис. 3 - Подвижные опоры (трекеры) для установки солнечных батарей

Сетевые солнечные электростанции целесообразно использовать на предприятиях, офисных зданиях, в различных торговых центрах, поскольку в этих учреждениях максимальное потребление электроэнергии происходит в светлое время суток.

Стоимость и окупаемость. Комплектующие для сетевых солнечных электростанций производятся в различных странах, в том числе, и в России. Это определяет относительно приемлемые цены и снижает зависимость итоговой стоимости станции от курса валют. Срок окупаемости зависит от изменения тарифов на электроэнергию. По расчетам на сегодняшний день сетевая солнечная электростанция полностью окупит себя через 7-8 лет.

2. Несетевые солнечные электростанции. Фотоэлектрические системы бывают резервными и автономными.

- **Резервные фотоэлектрические системы** электропитания применяются там, где существует возможность подключения к сетям централизованного электроснабжения, но они ненадежны или работают с перебоями. Таким образом, резервные системы могут

использоваться для электроснабжения объектов в периоды, когда в сети отсутствует напряжение или его мощность недостаточна.

- Автономные фотоэлектрические системы используются там, где нет централизованных линий электропередач (прокладка сетей затруднена или экономически нецелесообразна) или для электропитания передвижных объектов (сельские дома, дачи, фермы, автомобили, лодки, уличные солнечные фонари и так далее).

- **Автономные электростанции на солнечных батареях.** структурная схема простейшей автономной ФЭС мощностью 0,01...100 кВт , предназначеннной для электроснабжения передвижных объектов или объектов, удаленных от ЛЭП, показана на рис.4.

Основными элементами фотоэлектрической системы являются:

- солнечные модули,
- блок аккумуляторных батарей,
- контроллер заряда/разряда аккумулятора,
- инвертор, преобразующий постоянный ток, вырабатываемый солнечными модулями, в переменный ток.

На территории Европы фотоэлектрические системы чаще всего решают проблему резервного энергообеспечения, так как возможность полностью автономной работы ограничивается недостаточным уровнем солнечного излучения в зимнее время.

К преимуществам использования фотоэлектрических систем относится их эффективность в местах, где прокладка линий электропередач затруднена или требует больших затрат, бесшумность работы, отсутствие необходимости проведения сложного технического обслуживания и экологическая чистота.

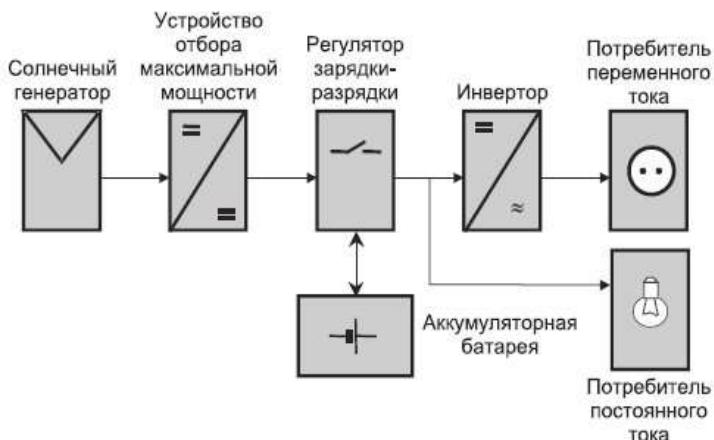


Рис.4 - Структурная схема простейшей автономной ФЭС мощностью 0,01...100 кВт.

Основные компоненты фотоэлектрических солнечных электростанций

Основными компонентами ФЭС являются солнечные модули (солнечные панели), инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный, аккумуляторные батареи, регуляторы отбора максимальной мощности, а также другое электрооборудование.

Солнечные панели (модули)

Солнечные панели, преобразующие часть солнечного излучения в постоянный электрический ток, являются основной частью любой ФЭС (рис.2,3). Каждая такая панель состоит из полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей, осуществляющих прямое, одноступенчатое преобразование солнечного света в электричество, в постоянный электрический ток. Соединяя фотоэлементы в модули (панели), а модули друг с другом, строят крупные ФЭС.

Фотоэлементы для панелей ФЭС изготавливают из полупроводникового кремния, легированного некоторым количеством мышьяка и бора. В настоящее время наибольшее распространение получили три вида солнечных панелей:

- монокристаллические;
- тонкопленочные;
- поликристаллические.

Монокристаллические панели (модули) на основе монокристаллического кремния имеют наивысшую эффективность преобразования энергии: их КПД, составляющий 17...18%, самый большой, а срок их службы – не менее 25 лет. Основной материал таких панелей – чистый кремний в виде больших монокристаллов, получаемых выращиванием с помощью кристаллика-затравки , который медленно вытягивается из кремниевого расплава. Большие стержни кристаллического кремния, полученные таким путем, разрезают на пластины (диски) толщиной 0,2...0,3 мм, в которых и создаётся р-п переход и другие фотоактивные слои фотопреобразователя. Затем происходит процесс металлизации, наносится просветляющее покрытие.

На конечной стадии изготовления фотоэлементы электрически соединяются, образуя модули. состоящие из 36 или 72 фотоэлементов. Полученную пластину обрамляют в алюминиевую раму, облегчающую ее крепление к несущей конструкции, закрывают закалённым защитным стеклом, герметизируют с помощью специального герметика. Мощность отдельной солнечной панели может достигать 10...260 Вт (рис.5).

Диапазон рабочих температур для получения оптимальной мощности данного вида солнечных панелей колеблется в пределах 15...25°C. Максимальная мощность достигается только при ясном небе, средней температуре воздуха 25°C и направлении панелей прямо на Солнце. При наличии даже небольшой облачности их мощность снижается на 70%, а в случае сильной облачности – на 90%. Поэтому, чтобы на практике обеспечить максимальную мощность монокристаллических панелей, их необходимо устанавливать в местах с большим числом солнечных дней в году и применять автоматические системы слежения за направлением на Солнце.

Поликристаллические солнечные панели, эффективность которых не так сильно зависит от угла падения солнечных лучей и которые имеют срок службы не менее 20 лет, являются альтернативой монокристаллическим панелям. КПД солнечных панелей на основе поликристаллического кремния составляет 12-15 %.

Тонкопленочные панели– наиболее дешевый вариант из всех видов солнечных панелей, обеспечивающий минимальную себестоимость их производства. Такие панели успешно работают при рассеянном излучении, не требуют прямых солнечных лучей, и их суммарная вырабатываемая за год мощность обычно на 10...15% превышает показатели традиционных кристаллических солнечных панелей. Поэтому такие панели преимущественно (на 95%) используются для ФЭС, генерирующих электроэнергию непосредственно в сеть, даже несмотря на то, что для установки тонкопленочных панелей требуется приблизительно в 2,5 раза больше площади, чем для панелей с монокристаллическими батареями. Тонкопленочные панели из-за меньшего КПД наиболее эффективно использовать в системах мощностью от 10 кВт, а монокристаллические и поликристаллические – для построения небольших автономных или резервных систем электроснабжения.

Электрическая коммутация солнечных модулей. Для получения необходимой мощности и рабочего напряжения солнечные панели соединяют последовательно или параллельно,

получая таким образом фотоэлектрический генератор (рис.6). Мощность этого генератора всегда оказывается меньшей, чем сумма мощностей отдельных панелей из-за потерь на рассогласование. Для снижения этих потерь необходим тщательный подбор в генераторе панелей с минимальным разбросом характеристик. Так, например, при последовательном соединении 10 панелей с разбросом характеристик в 10% потери на рассогласование составляют около 6%, а при разбросе в 5% они уменьшаются до 2%.

Эффект затенения или горячего пятна. При затенении одной панели или ее части в фотоэлектрическом генераторе при последовательном соединении отдельных панелей возникает, так называемый, «эффект горячего пятна» — затененная панель или часть ее начинает рассеивать всю мощность, вырабатываемую освещенными панелями (или ее частями), быстро нагревается и выходит из строя. Поэтому для устранения этого эффекта параллельно с каждой панелью (или ее частью) устанавливают шунтирующий диод. К каждой линейке последовательно соединенных панелей подключается также блокирующий диод — для выравнивания напряжений линеек. Схема фотоэлектрического генератора с подключенными параллельно с каждой его панелью диодами показана на рис.6. Модули устанавливаются на стальных или алюминиевых опорных конструкциях на земле (или на крышах и фасадах зданий — и при этом служат одновременно кровельным или защитным материалом).

Электрические параметры таких модулей представляются в виде вольтамперной характеристики, снятой при стандартных условиях (Standard Test Condition — STC), т.е. когда мощность солнечной радиации составляет 1000 Вт/м², температура элементов — 25°C и солнечный спектр — на широте 45° (рис. 7).

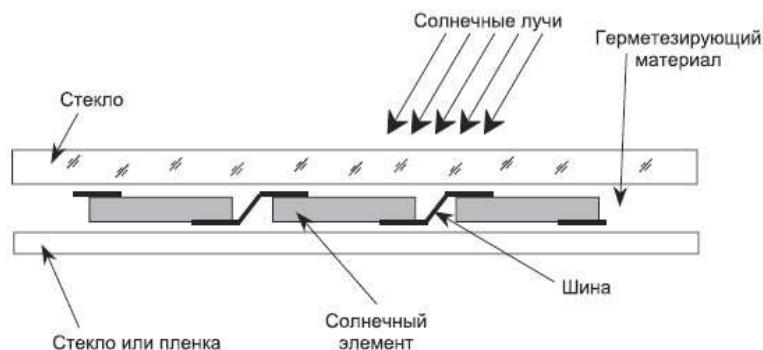


Рис. 5- Разрез солнечного модуля

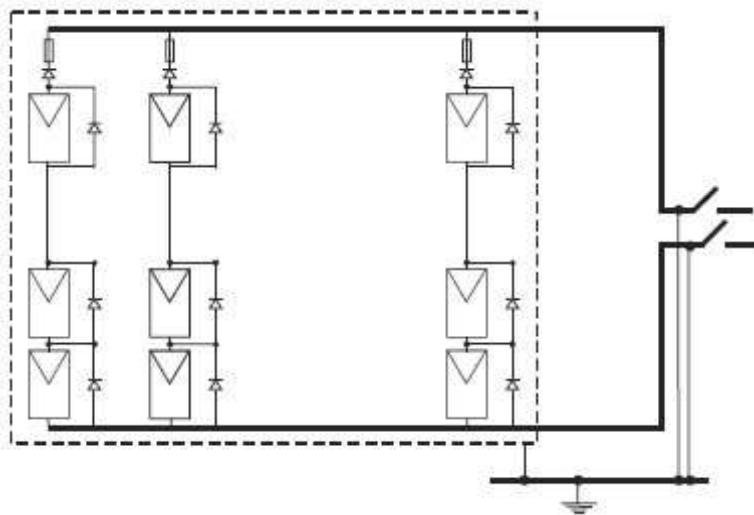


Рис. 6. Схема генератора фотоэлектрической системы

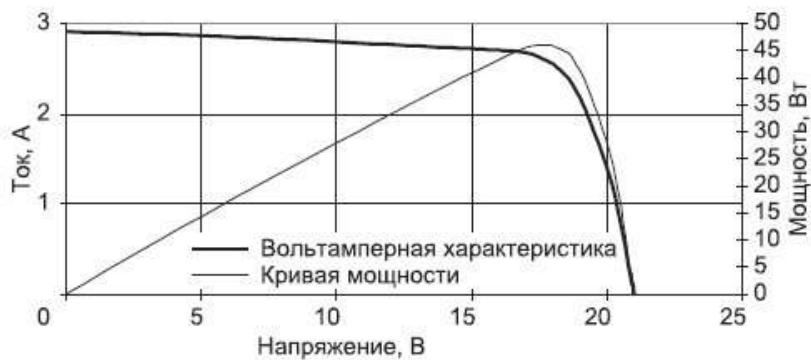


Рис. 7. Вольтамперная характеристика солнечного модуля

Номинальная мощность модуля определяется как наибольшая мощность при STC. Значение напряжения, соответствующее максимальной мощности называется напряжением максимальной мощности V_{mp} (рабочим напряжением), а соответствующий ток — током максимальной мощности I_{mp} (рабочим током). Значение рабочего напряжения для модуля, состоящего из 36 элементов приблизительно равно 16... 17 В (0,45...0,47 В/элемент) при 25°C. Такой запас по напряжению необходим для того, чтобы компенсировать снижение рабочего напряжения при нагреве модуля (солнечным излучением) — температурный коэффициент напряжения холостого хода для кремния составляет $\sim -0,4\%/\text{градус}$. Температурный коэффициент тока — положительный (0,07%/градус). Напряжение холостого хода модуля мало меняется при изменении освещенности (в то время как ток короткого замыкания прямо пропорционален). КПД солнечного модуля определяется как отношение максимальной мощности (модуля) к общей мощности излучения, падающей на его поверхность при стандартных условиях, и составляет 12...15%.

Вольтамперная кривая генератора имеет тот же вид, что и единичного модуля. Рабочая точка генератора, подключенного к нагрузке, не всегда совпадает с точкой максимальной мощности (тем более, что положение последней зависит от условий освещенности и температуры окружающей среды). Подключение таких нагрузок, как, например, электродвигатель, может сдвинуть рабочую точку системы в область минимальной или даже нулевой мощности (и двигатель просто не запустится). Поэтому следующий важный

компонент солнечных электрических систем — преобразователи напряжения, способные согласовывать солнечный модуль с нагрузкой.

Регуляторы отбора максимальной мощности. Как правило, в этих регуляторах реализуется принцип поиска максимума мощности путем коротких периодических изменений положения рабочей точки. Если при этом мощность на выходе прибора увеличивается, то положение рабочей точки изменяется в этом направлении при следующем шаге. Таким образом постоянно оптимизируется нагрузочная характеристика для отбора максимальной мощности, а также обеспечивается возможность регулировки в широком динамическом диапазоне и формирования импульсов тока, способных зарядить аккумуляторную батарею даже в условиях малой освещенности. Этот достаточно простой алгоритм может быть улучшен «запоминанием» часто повторяющихся направлений смещения рабочей точки (для устранения шагов смещения в ложных направлениях), что бывает важно в условиях быстро меняющейся освещенности.

На выходе регулятора формируются импульсы постоянного тока, ширина и частота следования которых зависит от мощности, производимой солнечным модулем в данный момент. При этом, если рабочее напряжение нагрузки меньше, чем рабочее напряжение модуля, то можно получать большие значения токов в нагрузке, чем ток короткого замыкания модуля. Следует учитывать, что регуляторы имеют КПД 0,85...0,95.

Инверторы. Солнечный генератор может вырабатывать только постоянный ток. Однако, существует много потребителей, использующих именно постоянный ток (зарядка аккумуляторов, освещение, радиоаппаратура и др.). Для преобразования постоянного тока аккумуляторной батареи в переменный синусоидальной формы необходим инвертор.

Инверторы — полупроводниковые приборы. Они могут быть разделены на два типа в соответствии с типом фотоэлектрических систем: 1) инверторы для автономных систем и 2) инверторы для сетевого применения. Выходной каскад у обоих типов во многом похож, а главное отличие — в схеме управления. Первый тип имеет генератор частоты, а второй должен работать синхронно с промышленной сетью (и в качестве генератора частоты использует саму сеть). Для всех типов основной параметр — КПД (который должен быть более 90%).

Выходное напряжение автономных инверторов в большинстве случаев составляет 220 В (50/60 Гц), а в инверторах мощностью 10...100 кВт можно получать трехфазное напряжение 380 В. Все автономные инверторы преобразуют постоянный ток аккумуляторных батарей, поэтому входное напряжение выбирается из ряда 12, 24, 48 и 120 В. Чем больше входное напряжение, тем проще инвертор и тем больше его КПД. При больших напряжениях значительно меньше потери на передачу энергии от солнечного генератора к аккумуляторной батарее, регулятору зарядки и инвертору, но при этом усложняется конструкция солнечного генератора и его эксплуатация при опасных напряжениях (выше 40 В).

К форме выходного сигнала автономных инверторов предъявляются менее жесткие требования. В ряде случаев (если позволяет нагрузка) возможно применение инверторов с трапециевидным выходным сигналом. Такие инверторы стоят в 2...3 раза дешевле инверторов с синусоидальным выходным сигналом. Важный параметр автономных инверторов — зависимость КПД от мощности подключенной нагрузки. КПД не должен заметно снижаться при подключении нагрузки в десять раз меньшей (по потребляемой мощности), чем номинальная мощность инвертора. В то же время инвертор должен выдерживать перегрузки в выходных цепях (при подключении электродвигателей или других динамичных нагрузок). В идеальном случае к автономному инвертору предъявляются следующие требования:

- способность выдерживать перегрузки (как кратковременные, так и длительные);

- низкие потери при малых нагрузках и на холостом ходу;
- стабилизация выходного напряжения;
- низкий коэффициент гармоник;
- высокий КПД;
- отсутствие помех на радиочастотах.

Примеры выходных сигналов сетевых инверторов и автономных инверторов приведены на рисунках 8 и 9, соответственно.

Промышленность производит широкий ассортимент инверторов, специально разработанных для фотоэлектрических систем. Такие инверторы включают блок регулятора отбора максимальной мощности, блок регулятора заряда, а также дополнительный вход подключения дизель-генератора (для экстренной подзарядки батареи).

К выходному сигналу сетевых инверторов предъявляются самые жесткие требования. Для уменьшения потерь на преобразование такие инверторы работают при высоких входных напряжениях (до 1000 В). Так как их входные цепи запитываются непосредственно от солнечного генератора, инверторы имеют регулятор отбора максимальной мощности (встроенный в инвертор). Сетевые инверторы имеют также блок контроля мощности солнечного генератора (и включаются автоматически, как только мощность генератора становится достаточной для формирования переменного сигнала).

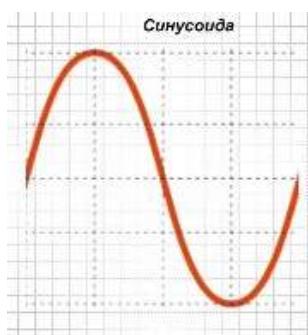


Рис. 8

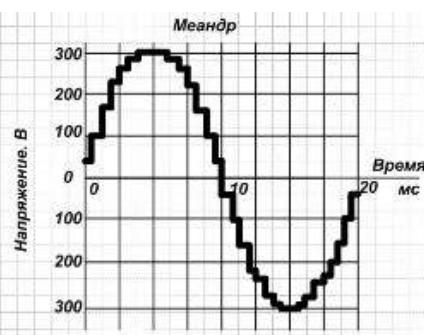


Рис. 9

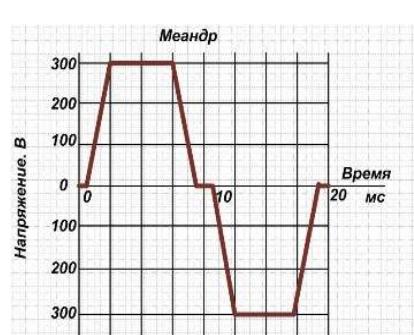


Рис.9

Сравнение солнечных фотоэлектростанций с основными возобновляемыми источниками энергии.

Занимаемые площади. В таблице 2 приведены удельные мощности разных типов электростанций (с учетом площадей, занимаемых сооружениями и зданиями). При расчетах принималось, что все земли имеют одинаковую стоимость. Для тепловых и атомных станций учитывались территории, занятые под добычу угля и руды. Площади производств строительных и конструкционных материалов не учитывались — они приблизительно одинаковы для всех типов станций. Ожидается уменьшение удельной мощности атомных станций за счет увеличения территорий, занятых под захоронение отходов. Для солнечных станций (особенно фотоэлектрических) данный показатель должен увеличиваться за счет увеличения КПД преобразователей и большего использования возможности размещения их на крышах зданий.

Тип электростанции

Удельная мощность,
МВт/км²

Таблица 2. Удельные мощности разных типов электростанций

Солнечные станции	50...100
Ветровые станции	до 15
Гидростанции	до 10
Энергия биомассы	до 5
Тепловые станции	до 30
Атомные станции	60...120

Энергоотдача. Данный показатель определяется как отношение количества энергии, выработанной системой за срок службы, к количеству энергии, затраченной на производство материалов и оборудования (для этой системы). Энергоотдача — основной (с точки зрения будущего полного перехода на возобновляемые источники энергии) показатель, т.к. характеризует реальный прирост энергии к общему балансу (табл. 3).

Таблица 3. Энергоотдача разных типов электростанций

Тип станций	Энергоотдача
Солнечные станции:	
фотоэлектрические	20...100
фототермические	10...50
Ветровые станции	более 20
Энергия биомассы	более 20
Тепловые станции	более 15
Атомные станции	6...13

Из таблицы видно, что лучшую энергоотдачу имеют солнечные станции (в перспективе ожидается, что значение еще улучшится). При использовании фотоэлектричества мы получаем возобновляемую энергию и расходуем минимальное количество невозобновляемых материалов (все материалы, кроме, например, древесины). Более того, запасы основного материала — кремния (для изготовления стекла и солнечных элементов) достаточно велики.

Контрольные вопросы

1. Виды солнечных фотоэлектрических электростанций.
2. Назначение и структурная схема сетевой фотоэлектростанции.
3. Основные компоненты сетевой ФЭС и их функциональное назначение ?
4. Способы коммутации солнечных модулей.
5. Вольт-амперная характеристика солнечного модуля и солнечной батареи.
6. Что называют номинальной мощностью солнечного модуля?
7. Как определяется к.п.д. солнечного модуля?
8. Форма выходного сигнала сетевого инвертора.

1.23 Лабораторная работа № ЛР-23 (2 часа)

Тема: «Автономные солнечные ФЭС (устройство, компоненты, работа)»

1.23.1 Цель работы: Ознакомиться с устройством и работой автономных солнечных фотоэлектростанций.

1.23.2 Задачи работы: Ознакомиться с устройством и работой автономной солнечной фотоэлектростанции.

1.23.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Мультимедийный проектор;
2. Компьютер;
3. Автономная ФЭС.

1.23.4 Описание (ход) работы:

1. Изучить теоретическое введение и записать основные сведения о конструкции автономной ФЭС, функциональном назначении её компонентов и работе.

Автономные ФЭС – это солнечные фотоэлектрические системы (электростанции), предназначенные для электропитания передвижных или удаленных объектов, лишенных возможности подвода линии электропередач. Причина может заключаться в нецелесообразности или невозможности подвода электрической линии.

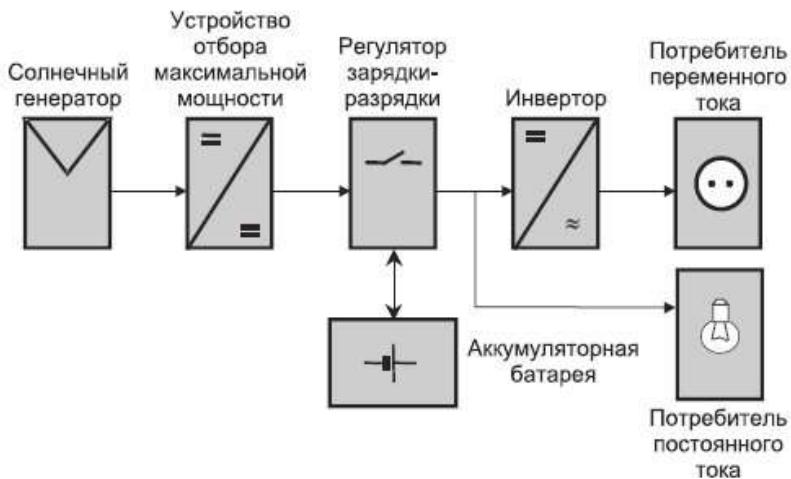
Основные компоненты автономной ФЭС : солнечные батареи, контроллер заряда-разряда аккумуляторной батареи, аккумуляторная батарея и соединительные кабели. Если нагрузка (различные устройства) питается от переменного напряжения, то необходим еще инвертор. Схема ФЭС показана на рис.1, 2.



Рис.1



Рис.2



Принцип работы ФЭС заключается в следующем: солнечная батарея в светлое время суток ведет заряд аккумуляторных батарей АКБ. Контроллер заряда-разряда обеспечивает правильный режим заряда и разряда АКБ. При этом солнечная батарея при необходимости ведет питание дневных нагрузок. Нагрузки, работающие в темное время суток, питаются исключительно от АКБ. Нагрузки переменного тока запитываются через инвертор.

Для надёжной работы, подключаемых к ФЭС устройств (нагрузки), необходим правильный подбор компонентов фотоэлектрической системы, основанный на предварительном расчёте. Под расчётом ФЭС понимается определение номинальной мощности солнечных модулей, их количества, схемы соединения, выбор типа, ёмкости и условий эксплуатации АКБ, мощности инвертора и контроллера заряда – разряда, определение параметров соединительных кабелей.

Компоненты фотоэлектрических систем

Солнечные модули. Солнечные модули — основная часть любой фотоэлектрической системы. Наибольшее распространение получили солнечные модули из монокристаллических или поликристаллических кремниевых элементов. Солнечные элементы могут быть круглыми (диаметром 100,125 и 150 мм) или квадратными (82 x 82,100 x 100 или 125 x 125 мм). Мощность элементов — 0,9...2,7 Вт.

Солнечные модули наземного использования обычно конструируются для зарядки свинцово-кислотных аккумуляторных батарей с номинальным напряжением 12 В. При этом последовательно соединяются 36 солнечных элементов и затем собираются в модуль, разрез которого показан на рис. 3. Полученный пакет обрамляют в алюминиевую раму, облегчающую крепление к несущей (опорной) конструкции. Мощность солнечных модулей может достигать 10...350 Вт. Электрические параметры таких модулей представляются в виде вольтамперной характеристики, снятой при стандартных условиях (Standard Test Condition — STC), то есть когда мощность солнечной радиации составляет 1000 Вт/м², температура элементов — 25°C и солнечный спектр — на широте 45° .

Номинальная мощность модуля определяется как наибольшая мощность при STC. Значение напряжения, соответствующее максимальной мощности называется напряжением максимальной мощности V_{mp} (рабочим напряжением), а соответствующий ток — током максимальной мощности I_{mp} (рабочим током). Значение рабочего напряжения для модуля, состоящего из 36 элементов приблизительно равно 16... 17 В (0,45...0,47 В/элемент) при 25°C. Такой запас по напряжению необходим для того, чтобы компенсировать снижение рабочего напряжения при нагреве модуля (солнечным излучением) — температурный коэффициент напряжения холостого хода для кремния составляет ~ -0,4%/градус. Температурный коэффициент тока -положительный

(0,07%/градус). Напряжение холостого хода модуля мало меняется при изменении освещенности (в то время как ток короткого замыкания прямо пропорционален). КПД солнечного модуля определяется как отношение максимальной мощности (модуля) к общей мощности излучения, падающей на его поверхность при STC, и составляет 12...15%.

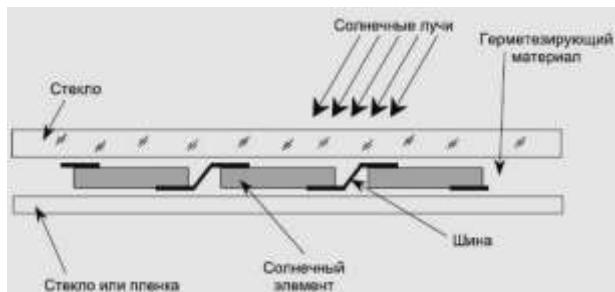


Рис.3- Разрез солнечного модуля

Для получения необходимой мощности и рабочего напряжения модули соединяют последовательно или параллельно. Таким образом получают фотоэлектрический генератор. Мощность такого генератора всегда меньше, чем сумма мощностей модулей — из-за потерь, обусловленных различием в характеристиках однотипных модулей (потерь на рассогласование). Чем тщательнее подобраны модули в генераторе (или, чем меньше различие в характеристиках модулей), тем меньше потери на рассогласование. Например, при последовательном соединении десяти модулей с разбросом характеристик 10% потери составляют приблизительно 6%, а при разбросе 5% — уменьшаются до 2%.

При затенении одного модуля (или части элементов в модуле) в генераторе при последовательном соединении возникает «эффект горячего пятна» — затененный модуль (элемент) начинает рассеивать всю производимую освещенными модулями (элементами) мощность, быстро нагревается и выходит из строя. Для устранения этого эффекта параллельно с каждым модулем (или его частью) устанавливают шунтирующий диод. Диод необходим при последовательном соединении более двух модулей. К каждой линейке (последовательно соединенных модулей) тоже подключается блокирующий диод для выравнивания напряжений линеек. Все эти диоды обычно размещаются в соединительной коробке самого модуля. Схема генератора приведена на рис. 4. Модули устанавливаются на стальных или алюминиевых опорных конструкциях на земле (или на крышах и фасадах зданий — и при этом служат одновременно кровельным или защитным материалом.

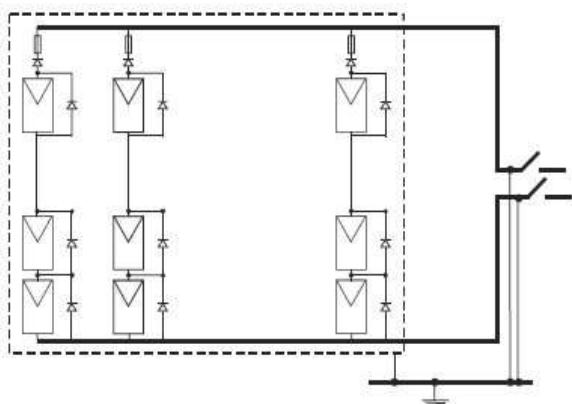


Рис. 4. Схема генератора фотоэлектрической системы

Регуляторы зарядки-разрядки (контроллеры). Стоимость регулятора заряда составляет не более 5% от стоимости всей системы (но от качества зарядных регуляторов

зависит ее работа). Чтобы защитить батарею от избыточной разрядки, нагрузка должна быть отключена, когда напряжение батареи падает ниже напряжения отключения. Нагрузка не должна подключаться до момента, когда напряжение не возрастет до определенного порога (напряжения подключения).

В некоторых моделях регуляторов используется звуковой сигнал, который сообщает пользователю о скором отключении нагрузки. Может предусматриваться и ручное отключение контроля нагрузки. Чтобы защитить батарею от перезарядки необходимо ограничить зарядный ток по достижении напряжения окончания зарядки. Напряжение начнет снижаться, пока не достигнет другого порога, называемого напряжением возобновления заряда.

Некоторые производители включают в набор функций регулятора управляемую перезарядку для выравнивания напряжения на аккумуляторах в батарее. Перезарядку следует проводить при постоянном напряжении 2,5 В/элемент после каждой глубокой разрядки и/или каждые 14 дней длительностью 1...5 часов. Нет необходимости проводить управляемую перезарядку в малообслуживаемых и необслуживаемых аккумуляторных батареях.

Все вышеуказанные значения напряжений должны измеряться непосредственно на клеммах батареи, поэтому падение напряжения на соединительных проводах аккумуляторной батареи и регулятора не должно превышать 4% от номинального в самых неблагоприятных рабочих условиях (т.е. когда подключена максимальная нагрузка, а из солнечного генератора не поступает ток). Если это невозможно или дорого, то проводят отдельную сигнальную линию на регулятор.

Электрические нагрузки, требующие высокого значения начального тока (например, электродвигатели) могут приводить к кратковременному падению напряжения на батарее ниже напряжения отключения нагрузки (даже если батарея имеет достаточный заряд). Чтобы предотвратить эту ситуацию, необходимо отключать нагрузку на 3...30 с после достижения порога напряжения отключения нагрузки. В регуляторах могут быть предусмотрены следующие виды защиты:

- от короткого замыкания в нагрузке;
- от подключения аккумуляторной батареи обратной полярностью;
- температурная компенсация значений пороговых напряжений (это бывает необходимо, если предполагается эксплуатация батарей при температурах ниже минус 10°C).

Регуляторы имеют светодиодную или жидкокристаллическую индикацию режимов работы и изготавливаются, как правило, в отдельном пылевлагозащищенном корпусе. Класс защиты — от IP32 (защита от песка и дождевых брызг) до IP65 (пылевлагонепроницаемый). Все сказанное относится к регуляторам для автономных солнечных систем небольшой мощности (до 1кВт). В более мощных системах функции контроля зарядки и разрядки берет на себя системный контроллер (управляющий также всей системой). В большинстве случаев это устройство сопряжено с компьютером (осуществляющим к тому же непрерывный мониторинг за работой компонентов с запоминанием значений освещенности, температуры, тока и напряжения для последующего анализа).

Аккумуляторные батареи. Выработанную солнечными модулями энергию можно сохранять в разных формах:

- химическая энергия в электрохимических аккумуляторах;
- потенциальная энергия воды в резервуарах;
- тепловая энергия в тепловых аккумуляторах;
- кинетическая энергия вращающихся масс или сжатого воздуха в резервуарах.

Для фотоэлектрических систем больше подходят электрохимические аккумуляторы, так как солнечный модуль производит, а потребитель потребляет электроэнергию, которая непосредственно и запасается в аккумуляторе. Большинство фотоэлектрических систем используют свинцово-кислотные аккумуляторы. Основными условиями по выбору аккумуляторов являются:

- стойкость к циклическому режиму работы;
- способность выдерживать глубокий разряд;
- низкий саморазряд;
- некритичность к нарушению условий зарядки и разрядки;
- долговечность;
- простота в обслуживании.

Важный параметр переносных (или периодически демонтируемых) солнечных систем — компактность и герметичность. Этим требованиям в полной мере удовлетворяют аккумуляторы, выполненные по технологиям «dryfit» и AGM (абсорбированный электролит) или рекомбинационной технологии. Они характеризуются отсутствием эксплуатационных затрат и перекрывают диапазон емкостей 1...12 000 Ач. Выделяющиеся при зарядке газы не выходят из аккумулятора, поэтому электролит не расходуется и обслуживание не требуется. Например, серия аккумуляторов SMG фирмы FIAMM (Италия) объединяет преимущества рекомбинационной технологии и обычных открытых батарей с трубчатыми положительными пластинами. Аккумуляторы имеют:

- длительный срок службы -15 лет;
- стойкость к циклическому режиму — более 1200 циклов;
- отсутствие необходимости обслуживания на протяжении всего срока службы;
- минимальное газовыделение ;
- отсутствие пуско-наладочных работ;
- саморазряд — приблизительно 3% в месяц.

Стоимость аккумуляторов и батарей такого типа составляет 150... 250 \$/кВтч. Поэтому, при необходимости можно использовать обычные стартерные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. Срок эксплуатации таких батарей в составе солнечной станции — не более 3...5 лет, поэтому за срок эксплуатации станции (15...20 лет и более) нужно будет заменять батареи (к этому добавятся затраты на обслуживание батарей и оборудование помещений). Если обслуживание проводит сам потребитель (а так бывает при использовании фотоэлектричества для электроснабжения отдельно стоящих удаленных жилых объектов — лесничества, дачные, сторожевые домики), то учитывая распространенность данного типа батарей, их применение в солнечных станциях оправдано. Для получения необходимого рабочего напряжения аккумуляторы или аккумуляторные батареи соединяют последовательно. При этом:

- применяют аккумуляторы только одного типа, выпущенные одним производителем;
- используют все аккумуляторы одновременно, не делая отводов от отдельных частей;
- не соединяют аккумуляторы в одну группу с разницей в дате выпуска более чем на месяц;
- обеспечивают разницу температур отдельных аккумуляторов не более 3°C.

Для продления срока службы аккумуляторов при циклическом режиме работы в солнечных системах важно не допускать и глубокого разряда. Степень разряда характеризуется глубиной разряда (DOD), выражаемую в процентах от номинальной емкости аккумулятора.

Эксплуатация аккумуляторов при глубоком разряде приводит к необходимости их более частой замены и обслуживания — и, соответственно, к удорожанию системы. Глубину разряда аккумуляторов в солнечных системах стремятся ограничить на уровне

30...40%, что достигается отключением нагрузки (снижением мощности) или использованием аккумуляторов большей емкости. Поэтому, для управления процессом зарядки и выбора оптимального режима в состав солнечной электрической станции обязательно включают контроллеры зарядки разрядки аккумуляторной батареи.

Регуляторы зарядки-разрядки (контроллеры). Стоимость регулятора заряда составляет не более 5% от стоимости всей системы (но от качества зарядных регуляторов зависит ее работа). Чтобы защитить батарею от избыточной разрядки, нагрузка должна быть отключена, когда напряжение батареи падает ниже напряжения отключения. Нагрузка не должна подключаться до момента, когда напряжение не возрастет до определенного порога (напряжения подключения).

В некоторых моделях регуляторов используется звуковой сигнал, который сообщает пользователю о скором отключении нагрузки. Может предусматриваться и ручное отключение контроля нагрузки. Чтобы защитить батарею от перезарядки необходимо ограничить зарядный ток по достижении напряжения окончания зарядки. Напряжение начнет снижаться, пока не достигнет другого порога, называемого напряжением возобновления заряда.

На практике выбор напряжения окончания и возобновления заряда -компромисс между обеспечением полного заряда (и усиленного испарения электролита при высоких напряжениях) и недозаряда (предотвращением коррозии электродов и потребления воды — низкие напряжения). Небольшие системы имеют тенденцию к перепотреблению энергии (а не к перезарядке) поэтому допускается перезарядка (высокое потребление воды) и следует использовать более высокое напряжение окончания заряда.

Некоторые производители включают в набор функций регулятора управляемую перезарядку для выравнивания напряжения на аккумуляторах в батарее. Перезарядку следует проводить при постоянном напряжении 2,5 В/элемент после каждой глубокой разрядки и/или каждые 14 дней длительностью 1...5 часов. Нет необходимости проводить управляемую перезарядку в малообслуживаемых и необслуживаемых аккумуляторных батареях.

Все вышеуказанные значения напряжений должны измеряться непосредственно на клеммах батареи, поэтому падение напряжения на соединительных проводах аккумуляторной батареи и регулятора не должно превышать 4% от номинального в самых неблагоприятных рабочих условиях (т.е. когда подключена максимальная нагрузка, а из солнечного генератора не поступает ток). Если это невозможно или дорого, то проводят отдельную сигнальную линию на регулятор.

Электрические нагрузки, требующие высокого значения начального тока (например, электродвигатели) могут приводить к кратковременному падению напряжения на батарее ниже напряжения отключения нагрузки (даже если батарея имеет достаточный заряд). Чтобы предотвратить эту ситуацию, необходимо отключать нагрузку на 3,...30 с после достижения порога напряжения отключения нагрузки. В регуляторах могут быть предусмотрены следующие виды защиты:

- от короткого замыкания в нагрузке;
- от подключения аккумуляторной батареи обратной полярностью;
- температурная компенсация значений пороговых напряжений (это бывает необходимо, если предполагается эксплуатация батарей при температурах ниже минус 10°C).

Регуляторы имеют светодиодную или жидкокристаллическую индикацию режимов работы и изготавливаются, как правило, в отдельном пылевлагозащищенном корпусе. Класс защиты — от IP32 (защита от песка и дождевых брызг) до IP65 (пылевла-

гонепроницаемый). Все сказанное относится к регуляторам для автономных солнечных систем небольшой мощности (до 1кВт). В более мощных системах функции контроля зарядки и разрядки берет на себя системный контроллер (управляющий также всей системой). В большинстве случаев это устройство сопряжено с компьютером (осуществляющим к тому же непрерывный мониторинг за работой компонентов с запоминанием значений освещенности, температуры, тока и напряжения для последующего анализа).

Инверторы. Солнечная батарея может вырабатывать только постоянный ток. Однако, существует много потребителей, использующих именно постоянный ток (зарядка аккумуляторов, освещение, радиоаппаратура и др.). Для преобразования постоянного тока аккумуляторной батареи в переменный синусоидальной формы необходим инвертор.

Инверторы — полупроводниковые приборы. Они могут быть разделены на два типа в соответствии с типом фотоэлектрических систем: 1) инверторы для автономных систем и 2) инверторы для сетевого применения. Выходной каскад у обоих типов во многом похож, а главное отличие — в схеме управления. Первый тип имеет генератор частоты, а второй должен работать синхронно с промышленной сетью (и в качестве генератора частоты использует саму сеть). Для всех типов основной параметр — КПД (который должен быть более 90%).

Выходное напряжение автономных инверторов в большинстве случаев составляет 220 В (50/60 Гц), а в инверторах мощностью 10...100 кВт можно получать трехфазное напряжение 380 В. Все автономные инверторы преобразуют постоянный ток аккумуляторных батарей, поэтому входное напряжение выбирается из ряда 12, 24, 48 и 120 В. Чем больше входное напряжение, тем проще инвертор и тем больше его КПД. При больших напряжениях значительно меньше потери на передачу энергии от солнечного генератора к аккумуляторной батарее, регулятору зарядки и инвертору, но при этом усложняется конструкция солнечного генератора и его эксплуатация при опасных напряжениях (выше 40 В).

К форме выходного сигнала автономных инверторов предъявляются менее жесткие требования. В ряде случаев, если позволяет нагрузка, возможно применение инверторов с трапециевидным выходным сигналом. Такие инверторы стоят в 2...3 раза дешевле инверторов с синусоидальным выходным сигналом. Важный параметр автономных инверторов — зависимость КПД от мощности подключенной нагрузки. КПД не должен заметно снижаться при подключении нагрузки в десять раз меньшей (по потребляемой мощности), чем номинальная мощность инвертора. В то же время инвертор должен выдерживать перегрузки в выходных цепях (при подключении электродвигателей или других динамичных нагрузок). В идеальном случае к автономному инвертору предъявляются следующие требования:

- способность выдерживать перегрузки (как кратковременные, так и длительные);
- низкие потери при малых нагрузках и на холостом ходу;
- стабилизация выходного напряжения;
- низкий коэффициент гармоник;
- высокий КПД;
- отсутствие помех на радиочастотах.

Промышленность производит широкий ассортимент инверторов, специально разработанных для фотоэлектрических систем. Такие инверторы включают блок регулятора отбора максимальной мощности, блок регулятора заряда, а также дополнительный вход подключения дизель-генератора (для экстренной подзарядки батареи).

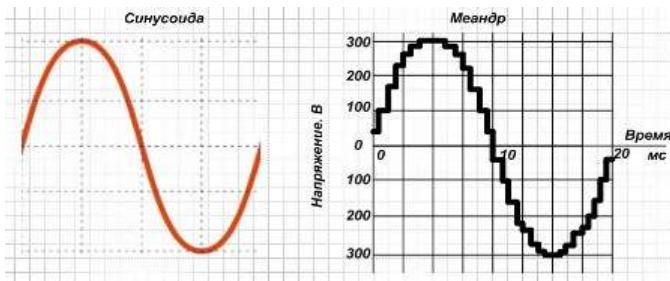


Рис.5 – Форма выходного напряжения сетевого инвертора (синусоида)

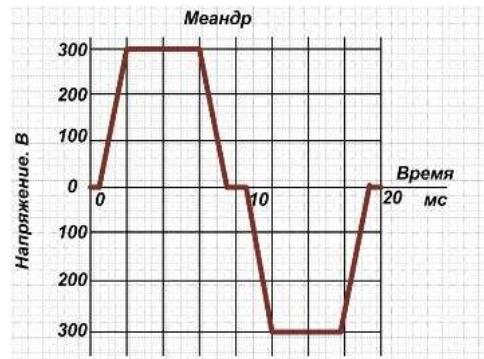


Рис.6 – Форма выходного напряжения автономного инвертора (трапеция)

2. Ознакомиться с устройством и работой автономной ФЭС , имеющей в своём составе двухсторонний солнечный модуль MSW- 80/40.

Контрольные вопросы

1. Что такое солнечный фотопреобразователь, солнечный модуль, солнечная батарея и фотоэлектрическая система (ФЭС) ?
2. Что такое автономная фотоэлектрическая система (фотоэлектростанция) ?
3. Основные компоненты автономной ФЭС и их функциональное назначение ?
4. Принцип работы автономной ФЭС.
5. Форма выходного сигнала сетевого инвертора.
6. Чему равна стандартная энергетическая освещённость ?
7. Что называют номинальной мощностью и к.п.д. солнечного модуля?

1.24 Лабораторная работа № ЛР-24 (2 часа)

Тема: «Расчёт автономной ФЭС»

1.24.1 Цель работы: освоить методику расчёта автономной фотоэлектрической системы (электростанции)

1.24.2 Задачи работы:

1. Изучить методику расчёта автономной фотоэлектрической системы (электростанции).
2. Выполнить расчёт автономной ФЭС для предложенного набора нагрузок переменного тока.

1.24.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Мультимедийный проектор;
2. Компьютер;

1.24.4 Описание (ход) работы:

Автономные ФЭС – это солнечные фотоэлектрические системы (электростанции), предназначенные для электропитания передвижных или удаленных объектов, лишенных возможности подвода линии электропередач. Причина может заключаться в нецелесообразности или невозможности подвода электрической линии.



Принцип работы ФЭС заключается в следующем: солнечная батарея в светлое время суток ведет заряд аккумуляторных батарей АКБ. Контроллер заряда-разряда обеспечивает правильный режим заряда и разряда АКБ. При этом солнечная батарея при необходимости ведет питание дневных нагрузок. Нагрузки, работающие в темное время суток, питаются исключительно от АКБ. Нагрузки переменного тока запитываются через инвертор.

Для надёжной работы, подключаемых к ФЭС устройств (нагрузки), необходим правильный подбор компонентов фотоэлектрической системы, основанный на предварительном расчёте. Под расчётом ФЭС понимается определение номинальной мощности солнечных модулей, их количества, схемы соединения, выбор типа, ёмкости и условий эксплуатации АКБ, мощности инвертора и контроллера заряда – разряда, определение параметров соединительных кабелей.

Расчет фотоэлектрической системы состоит из нескольких этапов:

1. Вначале необходимо составить перечень всех нагрузок. Это удобно делать при помощи таблицы. Кроме названий подключаемых устройств в столбцах таблицы следует указать мощность каждого устройства, его среднесуточное время работы и количество однотипных приборов.

Электроэнергия, получаемая с помощью ФЭС, дорогая и нужно отказаться от лишних или мощных приборов, которые целесообразней питать от генератора. Имеет смысл использовать нагрузки постоянного тока. Это позволит не приобретать инвертор и экономить энергию, поскольку к.п.д. инвертора обычно 85-95%.

2. Расчет суточного энергопотребления W_c (в кВт · час). Для этого надо для каждого типа нагрузки перемножить её мощность, количество приборов и среднесуточное время работы. Полученные результаты сложить, что и даст энергию, потребляемую в течение суток. Для круглосуточно работающих приборов нужно найти в паспорте изделия его суточное потребление.

Например, нагрузочные устройства ФЭС следующие:

1. Телевизор мощностью 30 Вт, работает 4 часа в сутки;
2. Осветительные лампы – 3 шт., по 15 Вт, работают 6 часов в сутки;
3. Холодильник с энергопотреблением 600 Вт·ч/сутки.

Итого получаем: $W_c = 30 \text{ Вт} \cdot 4 \text{ ч} + 15 \text{ Вт} \cdot 3 \cdot 6 \text{ ч} + 600 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 990 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$. За месяц энергопотребление примерно равно $W = 990 \cdot 30 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 30 \text{ кВт} \cdot \text{час}$.

Для нагрузок, использующих переменный ток, расчет нужно вести отдельно и заслуживать в их потребление запас 5 % - 15% (в сторону увеличения) для учета к.п.д. инвертора, то есть его энергопотребления. При питании от инвертора (переменный ток) можно грубо учесть потери в нём, умножив энергопотребление W на коэффициент $K_i = 1,2$.

В примере для приведенных устройств переменного тока:

суточное энергопотребление $W_c = 1,2 \cdot 990 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 1200 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$; (округлено)

месячное энергопотребление $W = 1,2 \cdot 990 \cdot 30 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 36 \text{ кВт} \cdot \text{час}$. (округлено)

3. Определение емкости аккумуляторной батареи АКБ

- Нужно выбрать номинальное напряжение аккумуляторной батареи;
- Оценить количество пасмурных (несолнечных) дней подряд, в течение которых АКБ должна работать без заряда от солнечной батареи, а также достигаемую при этом глубину разряда.

Обычно для автономных систем глубина разряда выбирается не более 30-50%. Это позволяет продлить срок службы АКБ.

- Цифра суточного энергопотребления W_c л умножается на количество пасмурных дней и полученная величина должна составлять глубину разряда АКБ от её полной энергии.

Как известно, емкость АКБ в значительной степени зависит от температуры помещения. Процесс этот обратимый, то есть при повышении температуры до нормальной емкость восстанавливается. Однако, работа аккумуляторов при высоких температурах вредна для них. При низких температурах емкость АКБ снижается и поправку на это снижение необходимо заслуживать при расчете системы.

Окончательная емкость АКБ получается умножением расчетной энергии, заключенной в ней, на коэффициент k (поправку на температуру АКБ) из приведенной таблицы и последующим делением на напряжение АКБ.

Полученную величину округляют в большую сторону к стандартным емкостям аккумуляторных батарей. Параллельно-последовательное соединение позволяет набрать нужную электроемкость АКБ.

Таблица 1

T, °C	25	20	15	10	5	0	- 5
K	1,00	1,03	1,10	1,2	1,28	1,36	1,50

В примере берутся следующие данные:

напряжение аккумуляторной батареи $U_{\text{АКБ}} = 12 \text{ В}$;

глубина разряда батареи $k_{\text{гр}} = 0,5$ (50 %);

количество пасмурных дней $n = 2$ дня

температура аккумуляторной батареи $t_{\text{АКБ}} = 25^\circ\text{C}$

поправка на температуру АКБ $k = 1$

суточное энергопотребление $W_c = 1200 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$

Емкость АКБ определяем, как было указано выше:

$$C = W_c \cdot n \cdot k / k_{\text{гр}} \cdot U_{\text{АКБ}} = 1200 \cdot 2 \cdot 1 / 0,5 \cdot 12 = 2400 / 6 = 400 \text{ А} \cdot \text{ч}$$

4. Мощность инвертора должна быть на 25-30% выше суммарной номинальной мощности одновременно подключаемых нагрузок.

Кроме того, его пиковая мощность должна быть больше суммарной пиковой мощности нагрузок, которые могут запуститься единовременно. Это связано с тем, что некоторые

приборы имеют значительную пусковую мощность при включении. Например, холодильник, насос или иная нагрузка с двигателем. Пусковая мощность таких устройств может в 3 – 7 раз (в течение нескольких секунд) превышать номинальную, рабочую.

В примере. Рассчитаем суммарную пиковую мощность нагрузок. Холодильник при включении потребляет мощность, превышающую рабочую не менее, чем в три раза. Полагаем, что мощность холодильника (компрессорного) в примере равна 200 Вт. Пусковую мощность получаем, умножая рабочую мощность на 3. Получаем 600 Вт. Кроме того, полагаем, что в моменты включения холодильника все остальные нагрузки тоже работают. Это составляет почти 400 Вт. Таким образом, суммарная пиковая мощность составляет 1000 Вт.

Поэтому мощность инвертора должна быть не менее $P_i = 1,3 \cdot 1000 = 1300$ Вт.

5. Определение суммарной мощности модулей солнечной батареи.

Для расчета потребуется значение солнечной инсоляции, которое берется за период работы станции (ФЭС), когда солнечная радиация минимальна.

При определении этой величины нужно учесть несколько факторов:

- географическое месторасположение объекта;
- период эксплуатации: лето, зима, круглый год;
- режим эксплуатации: выходные, ежедневно, иная схема;
- наличие деталей рельефа или пейзажа, которые могли бы загораживать поток солнечного света к поверхности солнечных батарей в течение дня;
- возможность применения подвижной платформы, следящей за положением солнца.

Чтобы система ФЭС вырабатывала нужное количество энергии за весь период эксплуатации, необходимо вести расчет для условий наихудшей инсоляции. При круглогодичном использовании ФЭС таким месяцем является декабрь. В это время года максимально низкая инсоляция, очень короткий световой день и низкая облачность в большинстве регионов России.

Оптимальный угол наклона ϑ солнечных панелей к горизонту разный в разных регионах страны. Этот угол увеличивается в высоких (более северных) широтах из-за низкого положения Солнца над горизонтом.

Существует простая методика выбора угла наклона ϑ солнечных модулей при ориентации их на юг:

- чтобы получить максимум энергии летом нужно солнечные панели (модули) разместить под углом на 15° меньше географической широты местности;
- чтобы получить максимум энергии в зимнее время года нужно панели наклонить к горизонту под углом на 15° больше географической широты местности;
- чтобы получить максимум энергии за весь год угол наклона солнечных батарей должен быть равен широте местности;
- выбрав угол наклона солнечных модулей, необходимо найти в таблицах солнечной инсоляции её значение для данного региона, времени года и угла наклона принимающей поверхности.

Данные о инсоляции (месячные и суммарные годовые значения) для основных районов России можно найти в справочной литературе по метеорологии и в Интернете.

К примеру для Краснодара (географическая широта – 45°) в июле и для угла наклона солнечных модулей $\vartheta = 30^\circ$ инсоляция составляет примерно $180 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$.

Это означает, что в июле в Краснодаре поступление солнечной радиации составляет 180 пикочасов.

Пикочасом называется условный промежуток времени в течении, который интенсивность солнечной радиации (энергетическая освещённость горизонтальной поверхности) равна $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Именно такая освещенность используется для паспортизации солнечных модулей.

Таким образом, в Краснодаре в июле в день имеем 6 пикочасов, то есть в течение 6 часов Солнце как бы создаёт энергетическую освещённость $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$, при которой солнечный модуль или батарея выдают максимальную электрическую мощность.

На самом деле световой день, конечно, больше чем 6 часов. Однако в течение дня энергетическая освещённость батарей разная, достигая максимума при положении Солнца в зените. Помимо инсоляции в расчете следует учитывать сильный нагрев модуля в летнее время, что снижает его эффективность. **Это учитывается введением сезонного коэффициента k_c**

Упрощенная формула для расчета необходимой мощности массива солнечных модулей и количества модулей. Определяется по количеству пикочасов, исходя из того, что суммарная мощность всех солнечных модулей, образующих батарею, равна энергии, необходимой для потребления за определённый выбранный период времени с учётом различных потерь и условий эксплуатации.

Один модуль мощностью P вырабатывает в течение выбранного периода времени (месяц, сезон, год) следующее количество энергии W_m :

$$W_m = k_c \cdot P \cdot E / 1000$$

Здесь, k_c - сезонный коэффициент, равный летом 0,55, а зимой 0,7 ;

E - значение солнечной инсоляции за выбранный период времени, $\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$;

$1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ – стандартная энергетическая освещённость ;

$t = E / 1000$ - количество пикочасов в течение выбранного периода.

Количество энергии W , необходимой для потребления за этот период равно:

$$W = W_c \cdot \text{количество дней} = N \cdot W_m = N \cdot k_c \cdot P \cdot E / 1000 \quad (1)$$

Суммарная мощность модулей или мощность солнечной батареи равна

$$P_{CB} = N \cdot P = W \cdot 1000 / k_c \cdot E \quad (2)$$

Отсюда определяем количество солнечных модулей N , необходимых для получения этой энергии:

$$N = W \cdot 1000 / k_c \cdot P \cdot E \quad (3)$$

Здесь,

W_c - суточное энергопотребление, $\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{сутки}$;

$W = W_c \cdot \text{количество дней}$ - электроэнергия, необходимая для потребления;

W_m - энергия, вырабатываемая одним модулем в течение выбранного периода, $\text{Вт}\cdot\text{ч}$;

P - мощность одного модуля, соответствующая освещённости $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$;

N - количество модулей, образующих батарею.

Коэффициент k_c учитывает все потери (нагрев батареи под солнцем, учитывает наклонное падение света в течение дня, потери на заряд АКБ), за исключением потерь в соединительных кабелях. Сечение кабелей обычно подбирается из расчета потерь не превышающих 2-3%.

6. Определение суммарной мощности и количества солнечных модулей для приведенного примера для летнего периода Оренбурга

Предполагается, что солнечные модули ориентированы в пространстве оптимально и ничто их не загораживает в течении светового дня. Однако, системы слежения за положением Солнца нет.

- Географическая широта Оренбурга - примерно 52° с.ш. ;
- Оптимальный угол наклона модулей для летнего периода $\vartheta = 52^\circ - 15^\circ = 37^\circ$
- Солнечная инсоляция в летние месяцы в Оренбурге условно равна $E = 180 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ за один летний месяц (июнь, июль, август) ;
- Месячное энергопотребление, рассчитанное в пункте 2, $W = 36 \text{ кВт}\cdot\text{час}$;
- Сезонный коэффициент $k_c = 0,55$;
- По формуле (2) вычисляем суммарную мощность солнечных модулей

$$P_{СБ} = W \cdot 1000 / k_c \cdot E = 36 \cdot 10^3 \cdot 10^3 / 0,55 \cdot 180 \cdot 10^3 = 364,6 \text{ Вт}$$

- Выберем из таблицы 2 подходящий по параметрам тип модуля ; Например, для приведенных условий подходит модуль МСК – 95.
- Путём деления суммарной мощности $P_{СБ}$ на мощность одного модуля 95 Вт, определяем количество модулей $N = 4$. Суммарная мощность 4-х модулей МСК – 95 равна 380 Вт, что немного больше расчётной.

Выполнение заданий

Задание 1. Ознакомиться с методикой расчёта автономной ФЭС.

Задание 2. Осуществить расчёт автономной ФЭС для предложенного набора нагрузок переменного тока согласно описанной методике:

1. Составить перечень нагрузок ;
2. Расчёт суточного и месячного энергопотребления ;
3. Определение ёмкости аккумуляторной батареи ;
4. Оценить мощность инвертора ;
5. Определить мощность солнечной батареи и количество модулей.

Считать условия эксплуатации, угол наклона модулей оптимальными. Сезон эксплуатации – летний. Значение месячной инсоляции, напряжение аккумуляторной батареи $U_{АКБ}$, количество пасмурных дне (подряд) $n = 2$ определяются номером задания. При подборе модулей использовать таблицу 2.

Стандартные солнечные кремниевые модули

Таблица 2 Каркасные солнечные модули серии МСК

Модель	Размер, мм	$U_n, \text{ В}$	$U_{xx}, \text{ В}$	$I_{kz}, \text{ А}$	$U_p, \text{ В}$	$I_p, \text{ А}$	$W_p, \text{ Вт}$	Вес, кг
MCK-15	285*425*28	12	21,8	0,92	17	0,86-0,88	15	1,9
MCK-20	425*425*28	12	21,8	1,30	17	1,05-1,20	20	2,7
MCK-24	425*555*28	12	21,8	1,75	17	1,40-1,65	24	3,4
MCK-30	425*555*28	12	21,8	1,80	17	1,65-1,75	30	3,4
MCK-40	535*615*28	12	21,8	2,75	18	2,35-2,50	40	4,0
MCK-60	550*810*28	12	21,8	3,55	18	3,25-3,35	60	5,5
MCK-95	500*1185*28	12	21,8	5,58	18	5,00-5,27	95	7,2
MCK-120	705*1315*38	12	21,8	7,25	18	7,00-7,20	120	10

MCK-140	667*1467*38	12	21,8	8,25	18	7,78-8,05	140	12
MCK-185	805*1575*38	12	21,8	10,99	18	10,00-10,26	185	17
MCK-185	805*1575*38	24	43,6	5,59	36	5,00-5,13	185	17

В таблице 2 - U_p , I_p , W_p - рабочие напряжение, ток и мощность модуля.

Контрольные вопросы

1. Что такое солнечный фотопреобразователь, солнечный модуль, солнечная батарея и фотоэлектрическая система (ФЭС) ?
2. Что такое автономная фотоэлектрическая система ?
3. Основные компоненты ФЭС и их функциональное назначение ?
4. Что называется солнечной инсоляцией ?
5. Что называют 1 кВт · ч (киловаттчас) ? Чему равна эта величина в единицах системы СИ ?
6. Чему равна стандартная энергетическая освещённость ?
7. Что называется пикочасом ?
8. Как определить мощность солнечной батареи и количество её модулей ?
9. Методика расчёта автономной ФЭС.
10. Как определить энергию, вырабатываемую солнечным модулем за летний период ?