

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЙ

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов направления подготовки  
12.03.01 «Приборостроение» очной формы обучения*



Могилев 2022

УДК 681.7.069  
ББК 34.9  
И91

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «4» января 2022 г.,  
протокол № 4

Составитель ст. преподаватель Е. Н. Прокопенко

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

В методических рекомендациях кратко изложены теоретические сведения, необходимые для выполнения лабораторных работ. Методические рекомендации разработаны в соответствии с учебной программой по дисциплине «Источники и приемники излучений» для студентов направления подготовки 12.03.01 «Приборостроение» очной формы обучения

Учебно-методическое издание

## ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЙ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 31 экз. Заказ №

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

© Белорусско-Российский  
университет, 2022

## Содержание

1 Инструктаж по технике безопасности при проведении лабораторных работ по дисциплине «Источники и приемники излучений в неразрушающем контроле» .....	4
2 Изучение преобразователей для радиационного контроля .....	7
3 Изучение гальваномагнитных преобразователей .....	14
4 Изучение измерительных преобразователей для теплового контроля .....	19
5 Изучение ватт-амперных характеристик полупроводниковых лазеров и светодиодов.....	24
6 Изучение характеристик фотоприемников.....	30
7 Изучение амплитудно-частотных характеристик пьезопреобразователя .....	37
8 Изучение диаграммы направленности пьезопреобразователей.....	41
Список литературы .....	47

# **1 Инструктаж по технике безопасности при проведении лабораторных работ по дисциплине «Источники и приемники излучений в неразрушающем контроле»**

*Цель работы:* изучить правила по технике безопасности и охраны труда при проведении лабораторных работ по дисциплине «Источники и приемники излучений в неразрушающем контроле».

## **1.1 Основные теоретические положения**

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

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

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

Руководитель эксперимента и испытаний должен проинструктировать перед началом эксперимента каждого участника о правилах безопасной эксплуатации данной установки и проверить наличие защитных устройств. Все участники эксперимента должны вести себя так, чтобы не создавать опасные ситуации.

Перед включением все участники извещаются об этом, например, фразами: «Включаю установку», «Подаю напряжение» и т. д. По окончании эксперимента устройство должно быть отключено и надежно защищено от повторного включения.

В лабораторном практикуме имеются два вида опасности. Первый вид связан с применением электрических приборов и возможностями поражения электрическим током, а второй – с использованием лазерных приборов.

Работа на электроустановках требует внимательного и ответственного отношения со стороны всех участников эксперимента. Электрический ток оказывает на организм вредное физиологическое воздействие и, учитывая, что сопротивление тела человека колеблется от 10 до 100 кОм, при сравнительно небольшом напряжении может быть смертельный исход. Физиологическое действие электрического тока на организм представлено в таблице 1.1.

Условно безопасным напряжением переменного тока считается 36 В, а постоянного – 110 В.

При несчастных случаях с кажущимся смертельным исходом необходимо отключить установку и принимать меры к оживлению пострадавшего, включающие в себя искусственное дыхание и закрытый массаж сердца

(в зависимости от состояния пострадавшего), и не прекращать их до прибытия врача.

Таблица 1.1 – Воздействие электрического тока на организм

Сила тока, мА	Реакция человека при воздействии переменного тока 50 Гц	Реакция человека при воздействии постоянного тока
0,5...1,5	Легкое дрожание пальцев	Не ощущается
2,0...3,0	Сильное дрожание пальцев	Не ощущается
5,0...7,0	Слабая судорога	Зуд, ощущение нагрева
8,0...10,0	Сильная боль в пальцах и запястьях (руки еще можно оторвать от электродов)	Усиленное ощущение нагрева
20,0...35,0	Сильная судорога, затрудненное дыхание (руки парализуются)	Сильное ощущение нагрева, сокращение мускулов
50,0...80,0	Прекращение дыхания	Судороги, затрудненное дыхание, невозможность оторвать руки от электродов
90,0...100	Прекращение дыхания, при воздействии свыше 3 с возникает паралич сердца	Прекращение дыхания

Лазеры являются устройствами, представляющими повышенную опасность. Хотя существуют несколько факторов риска, связанных с лазерными установками, под лазерной безопасностью понимают способы защиты от факторов, связанных непосредственно с лазерным излучением [1].

Даже лазеры самой малой мощности (несколько милливатт) могут представлять опасность для зрения. При попадании в глаз луч лазера фокусируется в пятно очень малых размеров, что может за доли секунды привести к ожогам сетчатки глаза, частичной или полной необратимой потере зрения. Лазеры большей мощности способны вызывать поражения глаз даже рассеянным излучением. Прямое, а в некоторых случаях и рассеянное излучение такого лазера способно вызывать ожоги кожи и представляет пожарную опасность.

По степени опасности все лазеры принято подразделять на четыре класса.

*Класс 1.* Лазеры и лазерные системы очень малой мощности, не способные создавать опасный для человеческого глаза уровень облучения. Излучение систем класса 1 не представляет никакой опасности даже при долговременном прямом наблюдении глазом. Во многих странах к классу 1 относятся также лазерные устройства с лазером большей мощности, имеющие надежную защиту от выхода луча за пределы корпуса [1].

*Класс 2.* Маломощные видимые лазеры, способные причинить повреждение человеческому глазу в том случае, если специально смотреть непосредственно на лазер на протяжении длительного периода времени. Такие лазеры не следует использовать на уровне головы. Лазеры с невидимым

излучением не могут быть классифицированы как лазеры 2-го класса. Обычно к классу 2 относят видимые лазеры мощностью до 1 мВт [1].

*Класс 3.* Лазеры и лазерные системы с видимым излучением, которые обычно не представляют опасность, если смотреть на лазер невооружённым взглядом только на протяжении кратковременного периода (как правило, за счет моргательного рефлекса глаза). Лазеры, которые могут представлять опасность, если смотреть на них через оптические инструменты (бинокль, телескоп), обычно ограничены мощностью 5 мВт. Во многих странах устройства более высоких классов в ряде случаев требуют специального разрешения на эксплуатацию, сертификации или лицензирования [1].

*Класс 4.* Лазеры и лазерные системы большой мощности, которые способны причинить сильное повреждение человеческому глазу короткими импульсами ( $< 0,25$  с) прямого лазерного луча, а также зеркально или диффузно отражённого. Лазеры и лазерные системы данного класса могут значительно повредить кожу человека, а также оказать опасное воздействие на легко воспламеняющиеся и горючие материалы [1].

Так как в лабораторном практикуме применяются лазеры не выше второго класса опасности, то при проведении лабораторных работ необходимо соблюдать, чтобы прямое и отраженное лазерное излучение не попадало непосредственно в глаз в течение времени более 10 с.

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

Перед включением прибора (оборудования) к электросети необходимо убедиться в исправности заземляющих элементов, качества изоляции, предупредить находящихся рядом о подаче напряжения.

При выполнении лабораторных работ в лаборатории запрещается переносить приборы и аппаратуру с одного рабочего места на другое, выносить приборы и инструкции из лаборатории, производить произвольные переключения прибора (оборудования) и какие-либо работы по устранению неисправностей.

Эксплуатация приборов (оборудования) должна производиться только в присутствии преподавателя (лаборанта). Все работы необходимо выполнять, не касаясь токоведущих частей. При проведении экспериментов на рабочем месте не должны находиться посторонние предметы. Экспериментатор и окружающие не должны подвергаться действию магнитного поля напряженностью более 80 А/см.

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

## **1.2 Порядок выполнения работы**

Ознакомиться с краткими требованиями по охране труда при проведении лабораторных работ.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Почему переменный электрический ток более опасен по сравнению с постоянным?
- 2 Каким образом необходимо освобождать человека, попавшего под воздействие электрического тока?
- 3 В каком случае пораженному электрическим током необходимо проводить искусственное дыхание?
- 4 В каком случае пораженному электрическим током необходимо проводить закрытый массаж сердца?
- 5 До какого момента необходимо проводить оказание первой помощи пораженному электрическим током?
- 6 Почему лазерное излучение, попадающее в глаз, имеет более опасное последствие по сравнению с излучением, попавшим на кожные покровы?
- 7 Какие защитные мероприятия необходимо предпринимать при работе с лазерами?

## **2 Изучение преобразователей для радиационного контроля**

**Цель работы:** изучить основные физические закономерности и конструктивные особенности построения преобразователей для радиационного неразрушающего контроля; экспериментально исследовать статистические характеристики ионизированного космического фонового излучения.

### **2.1 Основные теоретические положения**

Радиационный вид неразрушающего контроля основан на регистрации взаимодействия с объектами контроля ионизирующих электромагнитных и корпускулярных излучений и анализе этого взаимодействия [3, 4].

Любой вид излучения при взаимодействии с веществом приводит к появлению ионизации и возбуждения. Заряженные частицы вызывают эти процессы непосредственно, при поглощении  $\gamma$ -квантов ионизацию создают быстрые электроны, возникающие в результате фотоэффекта, эффекта Комптона или при рождении пар, а в случае нейтронов ионизация создается быстролетающими ядрами. При этом одна первичная частица может привести к появлению сотен тысяч ионов, благодаря чему сопровождающие ионизацию вторичные эффекты (электрический ток, вспышка света, потемнение фотопластины и др.) могут быть замечены человеком непосредственно с помощью

его органов чувств; иногда эти эффекты остаются лишь усилить в нужное число раз. Регистрация ионизирующих излучений приборами основана на преобразовании излучений детектором и измерительной схемой в электрические сигналы, принятые в практике измерений [5].

На практике используется множество типов детекторов. В простейшем случае детектор только фиксирует факт прохождения через него частицы. К таким детекторам относится счетчик Гейгера – Мюллера, схема которого приведена на рисунке 2.1.

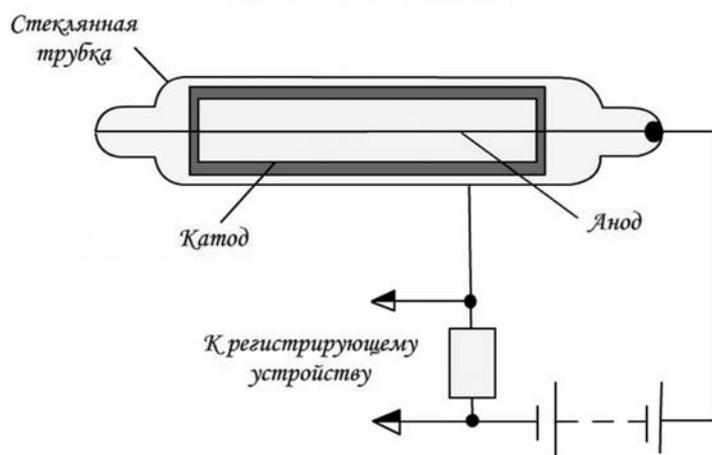


Рисунок 2.1 – Схема счетчика Гейгера – Мюллера

Обычно счетчик делают в виде стеклянной трубки, заполненной газом, внутренняя цилиндрическая поверхность которой покрыта тонким слоем металла, а вдоль оси натягивают тонкую металлическую проволочку-нить. В некоторых конструкциях счетчиков применяется металлическая трубка вместо стеклянной, а в некоторых типах счетчиков для регистрации  $\beta$ -излучения используется полимерная пленка. К слою подключают отрицательный, а к нити – положительный полюс источника тока.

Заряженная частица, пролетая в газе, ионизирует его, создавая положительно заряженные ионы и свободные электроны. Электрическое поле между анодом и катодом ускоряет электроны до энергии, при которой они способны производить ударную ионизацию в ранее нейтральном газе, поэтому в цепи анод–катод возникает лавинный самостоятельный разряд. Для того чтобы приготовить счетчик к восприятию новых частиц, разряд необходимо погасить. Это достигается включением в цепь большого сопротивления. В момент появления тока на этом сопротивлении возникает большое падение потенциала. В результате напряжение между катодом и анодом уменьшается настолько, что разряд прекращается и счетчик готов снова к работе. Гашение разряда также достигается введением гасящих добавок. В качестве гасящих добавок используются: этиловый и метиловый спирты, ацетон, бензол, изоамилацетат, диэтиловый эфир, этилен, изопентан, этилформиат и др., что позволяет получить временное разрешение счетчика порядка микросекунды. Наиболее часто используются спиртовые добавки.

В результате по цепи протекает импульс тока. Если в счетчик попадают другие частицы, когда разряд в нем еще не погашен, то все они будут зафиксированы как одна. Поэтому время, проходящее от появления одной частицы в счетчике до полного гашения вызванного ею разряда, называется «мертвым» временем счетчика.

Детекторы описанной конструкции могут работать в различных режимах. Если разность потенциалов между катодом и анодом настолько мала, что не возникает ударной ионизации и достаточно велика, что не наступает рекомбинация ионов, то измерив суммарный заряд и число ионов, можно найти энергию пролетевшей частицы. Работающий в таком режиме прибор называется ионизационной камерой [5].

С ростом напряжения на счетчике вблизи нити, где поле имеет наибольшую напряженность, начинается ударная ионизация, приводящая к возникновению лавин. Каждая лавина протекает независимо от других, что обеспечивает пропорциональное усиление первичной ионизации независимо от ее величины. Таким образом, величина импульса оказывается пропорциональна энергии ионизирующей частицы. Поэтому счетчик, работающий в этом режиме, называют пропорциональным счетчиком. Пропорциональные счетчики получили широкое распространение благодаря своей простоте и большим импульсам тока при прохождении заряженных частиц. Сейчас пропорциональные счетчики используют главным образом для регистрации  $\beta$ -излучения, мягкого  $\gamma$ -излучения,  $\alpha$ -частиц и нейтронов.

Чтобы избежать появления пробоев и выровнять электрическое поле, счетчик приходится делать очень тщательно, зачищая и полируя его электроды. Отполировать же нить, диаметр которой измеряется сотыми долями миллиметра (10...100 мкм), очень сложно. Если электрическое поле в счетчике будет неоднородным вдоль нити, то импульс будет зависеть не только от энергии частицы, но и от места ее попадания в счетчик, что, естественно, нежелательно. Поэтому конструкцию пропорционального счетчика часто приходится усложнять, вводя в него дополнительные электроды для выравнивания поля.

При дальнейшем увеличении напряжения счетчик переходит в режим самостоятельного разряда и величина заряда, созданного в процессе газового усиления, становится независимой от первичной ионизации. При этом теряется возможность определения величины энергии ионизирующей частицы. Задача счета частиц сильно облегчается, т. к. величина импульса даже при возникновении в счетчике одной пары ионов может достигать десятков вольт. Детекторы, работающие в таком режиме, называются счетчиками Гейгера – Мюллера. Амплитуда импульса от счетчика Гейгера – Мюллера может достигать нескольких десятков или даже сот вольт. С такими импульсами можно работать без всякого усиления. Амплитуда импульса в счетчике Гейгера – Мюллера определяется только свойствами самого счетчика и параметрами электрической цепи и совершенно не зависит ни от вида, ни от энергии первичной частицы. Импульсы от медленного электрона, создавшего всего

лишь несколько пар ионов, и от  $\alpha$ -частицы, создавшей несколько тысяч ионов, оказываются одинаковыми. Поэтому счетчики Гейгера – Мюллера можно использовать только для подсчета числа пролетевших частиц в однородных полях излучений, но не для определения их типа и энергии [5].

Для определения напряжений, необходимых для обеспечения различных режимов работы детектора, экспериментально строят его рабочую характеристику – график зависимости скорости счета частиц  $n$  от разности потенциалов между катодом и анодом  $U$ . Типичная характеристика имеет вид, приведенный на рисунке 2.2.

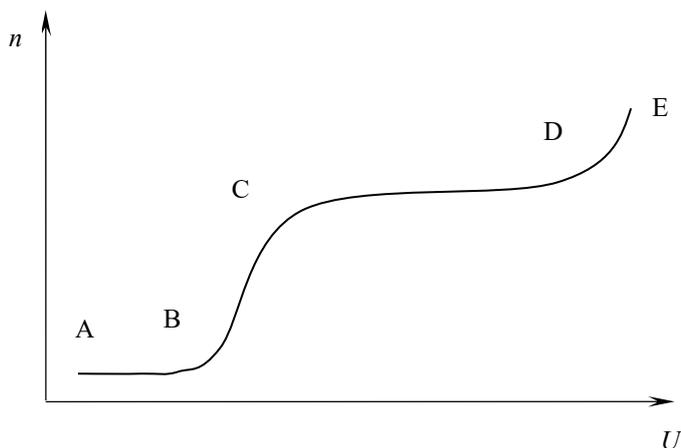


Рисунок 2.2 – Типичная счетная характеристика счетчика заряженных частиц

Область АВ соответствует режиму «ионизационная камера», ВС – пропорциональный счетчик, CD – счетчик Гейгера – Мюллера, а DE – непрерывному разряду. В режиме работы счетчика Гейгера – Мюллера рабочий участок (плато) имеет протяженность от десятков до сотен вольт, поэтому, если рабочая точка счетчика находится посередине плато, то число отсчетов практически равно числу ионизирующих частиц, попадающих в счетчик.

Кроме газовых детекторов для регистрации заряженных частиц применяются твердотельные полупроводниковые детекторы. Полупроводниковый детектор упрощенно можно представить себе как полупроводниковый диод с  $p$ - $n$ -переходом, смещенным в обратном направлении. При этом между электродами образуется зона, обедненная носителями заряда. При прохождении заряженной частицы через обедненную зону в ней образуются положительные и отрицательные свободные заряды («дырки» и электроны), которые под действием электрического поля движутся к электродам, формируя импульс тока. Для изготовления полупроводниковых детекторов используют как поверхностно-барьерные переходы, так и  $pin$ -структуры [5].

Сцинтилляционные детекторы используют совершенно особый принцип детектирования излучений. Характерной особенностью сцинтилляционных детекторов является наличие сцинтиллятора. Уже в начале прошлого века было замечено, что некоторые кристаллические вещества реагируют на прохождение заряженных частиц вспышками света. Физически это связано с тем, что наряду

с ионизацией атомов среды при прохождении частицы происходит также их возбуждение, сопровождающееся высвечиванием фотонов видимого света (или ультрафиолета). Количество фотонов во вспышке оказывается пропорционально энергии частицы. Чтобы превратить вспышку света в электрический импульс, используется фотоэлектронный умножитель (ФЭУ).

В настоящее время известно большое количество различных сцинтилляторов. Из кристаллических веществ наиболее широко используются монокристаллы NaI, CsI, поликристаллы ZnS. Монокристаллы используются для регистрации  $\gamma$ -излучения, с этой целью их выращивают различных размеров и конфигураций.

Поликристаллические сцинтилляторы используются обычно для регистрации  $\alpha$ -частиц или нейтронов в виде множества кристаллов, нанесенных тонким слоем на прозрачную подложку, под которой размещается ФЭУ.

Помимо неорганических кристаллических сцинтилляторов существуют еще органические кристаллы, например, стильбен, используемый в спектрометрии быстрых нейтронов, пластмассовые и жидкие сцинтилляторы.

Пластмассовые и жидкие сцинтилляторы в сравнении с кристаллическими характеризуются очень маленьким временем высвечивания, что позволяет использовать их при работе с очень быстрыми процессами, протекающими за времена до  $10^{-10}$  с.

## 2.2 Описание экспериментальной установки

Измерения проводятся с помощью дозиметра-радиометра АНРИ-01 «Сосна». Этот прибор имеет следующие технические данные и характеристики.

1 Диапазон измерения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения составляет 0,010...9,999 мР/ч.

2 Диапазон измерения мощности полевой эквивалентной дозы гамма-излучения составляет 0,10...99,99 мкЗв/ч.

3 Диапазон оценки объемной активности растворов (по изотопу  $^{137}\text{Cs}$ ) составляет  $1,85 \cdot 10^3 \dots 3,7 \cdot 10^4$  Бк/л или  $5 \cdot 10^{-8} \dots 10^{-6}$  Ки/л.

4 Диапазон измерения плотности потока бета-излучения с загрязненных поверхностей  $1,66 \cdot 10^3 \dots 8,33 \cdot 10^5$  1/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) или 10...5000 частиц/( $\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ ).

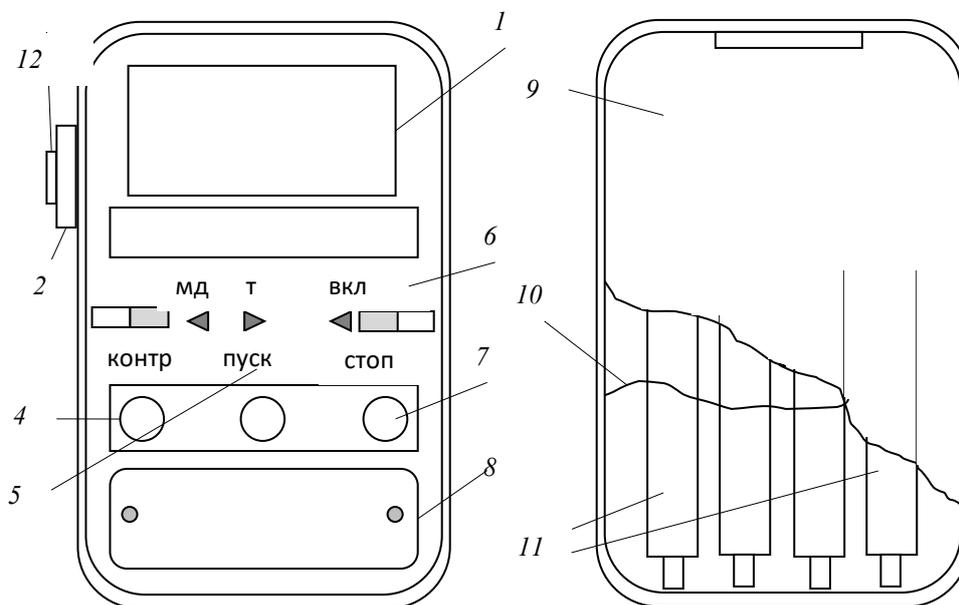
5 Диапазон энергий бета-излучения 0,06...1,25 МэВ или 9,6...200 фДж.

6 Диапазон энергий гамма-излучения 0,5...3 МэВ или 80...560 фДж.

Внешний вид прибора приведен на рисунке 2.3. При работе прибора преобразователь напряжения подает через ограничивающие RC-цепочки на аноды газоразрядных счетчиков постоянное напряжение порядка 400 В. При попадании в рабочие объемы счетчиков ионизирующих частиц на нагрузке счетчиков появляются электрические импульсы. Результат счета этих импульсов регистрируется на табло цифрового индикатора.

При установке переключателя режимов работы в положение МД, в приборе работает внутренний таймер, который через заданное время прекращает счет импульсов. Величина длительности временного интервала таймера подбирается

при регулировке таким образом, чтобы обеспечить прямой отсчет величины мощности экспозиционной дозы гамма-излучения в миллирентгенах в час на цифровом табло.



1 – жидкокристаллический индикатор; 2 – гнездо разъема для подключения выносного блока детектирования; 3 – переключатель режимов работы; 4 – кнопка контроля работоспособности прибора; 5 – кнопка «Пуск», включение измерения; 6 – выключатель питания; 7 – кнопка «Стоп», выключение измерения; 8 – крышка отсека элемента питания; 9 – задняя крышка; 10 – защитная пленка; 11 – счетчики Гейгера – Мюллера СБМ-20; 12 – заглушка

Рисунок 2.3 – Внешний вид дозиметра-радиометра АНРИ-01 «Сосна»

При установке переключателя режимов работы в положение «Т» таймер прибора не работает и время счета импульсов контролируется по часам. На цифровом табло индицируется количество импульсов за заданный период времени.

В схеме прибора предусмотрена возможность проверки исправности работы пересчетной схемы. При установке переключателя режимов работы в положение МД в приборе необходимо нажать кнопку «Контроль» и удерживать ее нажатой, запустить кнопкой «Пуск» счет импульсов. При этом на вход пересчетной схемы поступают импульсы от генератора таймера. За время измерения, заданное таймером, на цифровом табло индикатора при исправной работе пересчетной схемы должно набраться число 0,512.

### 2.3 Порядок выполнения работы

2.3.1 Экспериментально исследовать статистические характеристики ионизированного космического фонового излучения при закрытой крышке радиометра.

Подключить радиометр к источнику питания 9 В. Проверить работоспособность пересчетной схемы. Перевести переключатель в положение «Т» (крайнее правое положение). Включить кнопку «Пуск» и проводить измерение числа импульсов в течение двух минут. Измерение провести 7 раз и результаты измерений занести в таблицу. По результатам измерений определить среднее арифметическое значение импульсов за 2 мин и среднюю квадратичную погрешность.

2.3.2 Экспериментально исследовать статистические характеристики ионизированного космического фонового излучения при открытой крышке радиометра.

Провести измерения, аналогичные измерениям п. 2.3.1, но при открытой крышке прибора.

### ***Содержание отчета***

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, таблицы измерений, выводы о характере космического излучения, выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Что собой представляют  $\alpha$ -частицы?
- 2 Что собой представляют  $\beta$ -частицы?
- 3 Что собой представляет  $\gamma$ -излучение?
- 4 Что собой представляет газоразрядный счетчик?
- 5 Почему счетная характеристика счетчика заряженных частиц зависит от величины напряжения между анодом и катодом?
- 6 Зачем анод в счетчиках Гейгера – Мюллера изготавливается в виде тонкой проволоки?
- 7 Какие типы счетчиков частиц вам известны?
- 8 На каком принципе работают сцинтиляционные счетчики заряженных частиц?
- 9 На каком принципе работают полупроводниковые детекторы заряженных частиц?
- 10 Какие детекторы применяются в дозиметре-радиометре «Сосна»?

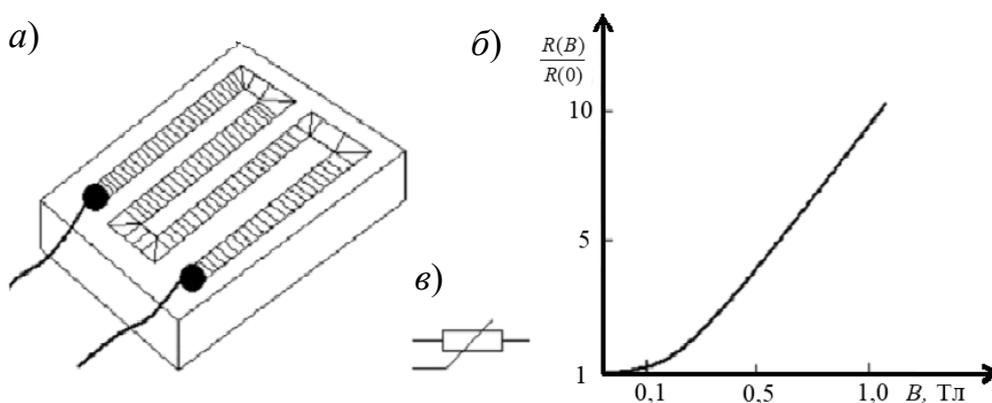
### 3 Изучение гальваномагнитных преобразователей

**Цель работы:** изучить основные физические закономерности и конструктивные особенности построения измерительных преобразователей для магнитного неразрушающего контроля; провести калибровку датчика Холла и измерить индукцию различных постоянных магнитов; экспериментально построить зависимость индукции постоянного магнита от расстояния.

#### 3.1 Основные теоретические положения

Движение электрических зарядов под действием магнитного поля (сила Лоренца) широко применяется для построения измерительных гальваномагнитных преобразователей, используемых в магнитном неразрушающем контроле. К таким преобразователям относят магниторезисторы, магнитодиоды, магнитотранзисторы и датчики Холла [5].

Магниторезистором называется полупроводниковый переменный резистор, увеличивающий сопротивление под действием магнитного поля вследствие магниторезистивного (гальваномагнитного) эффекта. Магниторезистивный эффект заключается в том, что при протекании электрического тока вдоль пластины полупроводника, помещенной во внешнее поперечное магнитное поле, происходит искривление траектории носителей зарядов вследствие действия отклоняющей силы Лоренца, что приводит к удлинению пути, проходимого носителями между электродами, к которым приложено внешнее электрическое поле, что эквивалентно возрастанию удельного сопротивления полупроводника. Конструктивно магниторезистор представляет собой нанесенную на ферромагнитную изолированную подложку зигзагообразную дорожку малой ширины из полупроводника с высокой подвижностью носителей зарядов (например, ZnSb, ZnAs, ZnSb + NiSb, InSb + NiSb), имеющую сопротивление в пределах от единиц до тысяч ом (рисунок 3.1).



*a* – общий вид; *б* – зависимость сопротивления магниторезистора от индукции магнитного поля; *в* – графический символ магниторезистора

Рисунок 3.1 – Магниторезистор

Дорожку пересекает в поперечном направлении ряд проводников, разбивающих ее на серию пластинок с малым отношением расстояния между проводниками к ширине дорожки. Под действием магнитного поля, направленного нормально плоскости дорожки, сопротивление последней увеличивается в несколько раз.

Магниторезистор имеет малую постоянную времени, что приводит к тому, что быстродействие прибора достигает несколько мегагерц, а в специальных образцах без ферритовой подложки – тысяч мегагерц. Основным параметром магниторезисторов является сопротивление  $R(0)$  в отсутствие магнитного поля (от 5 до 1000 Ом). Важнейшей характеристикой магниторезистора является зависимость сопротивления магниторезистора от приложенной индукции магнитного поля  $R(B)$ , вид которой в относительных величинах приведен на рисунке 3.1, б. Из этой зависимости видно, что при малых значениях индукции (до 0,2 Тл) магниторезистор имеет невысокую чувствительность к магнитному полю, а при значении индукции, превышающей 0,2 Тл характеристика носит линейный характер.

**Магнитодиодом** (МД) называется преобразователь магнитного поля, принцип действия которого основан на магнитодиодном эффекте. Магнитодиод представляет собой полупроводниковый прибор с  $p$ - $n$ -переходом и невыпрямляющими контактами, между которыми находится область высокоомного полупроводника. Отличие от обычных полупроводниковых диодов состоит в том, что магнитодиод изготавливается из высокоомного полупроводникового материала, проводимость которого близка к собственной, а ширина базы  $d$  в несколько раз больше диффузионной длины пробега носителей  $L$ , в то время как в обычных диодах  $d < L$ . В «длинных» диодах при прохождении электрического тока определяющими становятся процессы, зависящие от рекомбинации и движения неравновесных носителей заряда в базе и на поверхности. В прямом направлении при высоких уровнях инжекции проводимость магнитодиода определяется инжектированными в базу неравновесными носителями. Падение напряжения происходит не на  $p$ - $n$ -переходе, как в диоде, а на высокоомной базе. Если магнитодиод, через который протекает ток, поместить в поперечное магнитное поле, то произойдет увеличение сопротивления базы. Сопротивление базы увеличивается и за счет повышения роли поверхностной рекомбинации отклоняющихся к поверхности полупроводника носителей заряда [5].

Для изготовления магниточувствительных элементов магнитодиодов в основном используются германий (Ge) и кремний (Si).

Преимуществом германиевых магнитодиодов является высокая удельная магнитная чувствительность при низких напряжениях источника питания. Наивысшая чувствительность этих магнитодиодов достигается при больших значениях сопротивления нагрузки ( $R_n = 1 \dots 100$  МОм), но при этом сильно увеличивается постоянная времени и возрастает напряжение питания.

Главным недостатком германиевых магнитодиодов считается низкая предельная температура эксплуатации до плюс 85 °С.

Из известных полупроводниковых преобразователей магнитного поля наиболее перспективными считаются магниточувствительные транзисторы – приборы, обладающие высокой чувствительностью и разрешающей способностью. Принцип их работы заключается в управлении током базы за счет искривления траектории движения свободных носителей прикладываемым магнитным полем. Магнитотранзисторы – транзисторы, конструктивные и рабочие параметры которых оптимизированы для получения максимальной чувствительности коллекторного тока к магнитному полю. В зависимости от того, параллельно или перпендикулярно технологической поверхности кристалла протекает рабочий ток, магнитотранзисторы условно подразделяются на вертикальные и горизонтальные (латеральные). Вертикальные магнитотранзисторы (ВМТ) могут реагировать лишь на лежащую в плоскости кристалла (продольную) компоненту магнитного поля, а горизонтальные (ГМТ) – также и на перпендикулярную этой плоскости поперечную компоненту. В зависимости от того, к перпендикулярной или параллельной (относительно технологической поверхности) составляющей магнитного поля чувствительны магнитотранзисторы, они делятся соответственно на поперечные и продольные. В зависимости от природы переноса неосновных носителей заряда в базе магнитотранзисторы, в свою очередь, делятся на диффузионные и дрейфовые.

Очень широко в различных технических областях применяются датчики Холла. Датчики Холла широко используются там, где требуются высокая точность и надежность. Они находят применение в безколлекторных двигателях, измерителях различных величин, сварочном оборудовании, бытовых приборах, компьютерах и т. д. Основные преимущества этих датчиков заключаются в отсутствии механических движущихся частей и высоком быстродействии (до 100 кГц). Благодаря этому датчики Холла отличаются высокой надежностью, долговечностью и не требуют физического контакта с измеряемой средой [5].

Их принцип работы заключается в искривлении пути носителей тока в металлах и полупроводниках, находящихся в магнитном поле под действием силы Лоренца. К примеру, на рисунке 3.2 приведена схема образования холловской ЭДС.

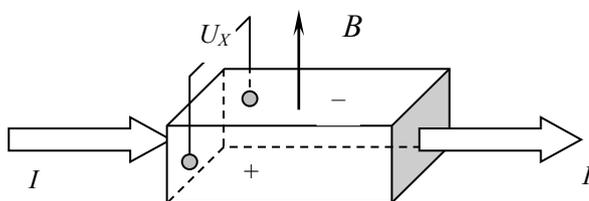


Рисунок 3.2 – Схема образования холловской ЭДС

При пропускании тока через кристалл преобразователя положительные заряды отклоняются измеряемым магнитным полем вправо, а отрицательные влево относительно направления распространения тока. В результате этого передняя грань кристалла заряжается положительно, а задняя – отрицательно,

т. е. возникает холловская ЭДС, величина которой определяется выражением

$$U_x = \gamma IB,$$

где  $\gamma$  – чувствительность преобразователя;

$I$  – управляющий ток;

$B$  – измеряемая индукция магнитного поля.

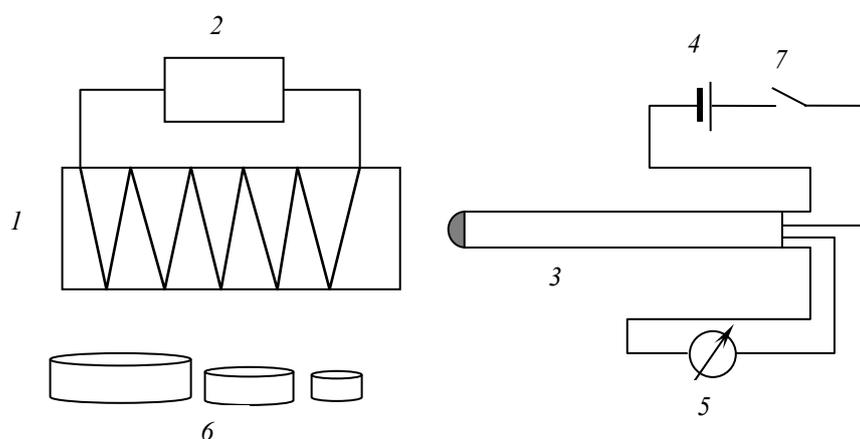
Чувствительность преобразователя и номинальное значение управляющего тока приводятся в паспорте. Абсолютное значение чувствительности колеблется в пределах от 0,06 до 0,6 В/Тл.

Конструктивно преобразователи выполняют в виде прямоугольных или крестообразных пластин толщиной порядка 200 мкм. Их изготавливают на основе кремния, германия и арсенида галлия. Размеры пластинок от 1,5 до 7 мм. Управляющие токи находятся в диапазоне 5...25 мА. Гальваномангнитные преобразователи служат для измерения слабых магнитных полей с индукцией менее 0,1 Тл.

Выходные каскады датчиков могут быть различных типов – аналоговые, когда выходной сигнал пропорционален магнитному потоку через датчик, и цифровые, имеющие два уровня сигнала на выходе. По реакции на магнитное поле датчики распределяются по трем группам: биполярные, однополярные и униполярные. Для включения биполярного датчика требуется воздействие поля положительной полярности, а для выключения – отрицательной. Однополярные датчики измеряют поля любой полярности, а униполярные – только одной (обычно положительной).

### 3.2 Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 3.3.



1 – соленоид; 2 – источник питания Б5-44; 3 – датчик Холла, приклеенный на стержень; 4 – источник питания для датчика Холла (батарейка); 5 – цифровой мультиметр DT-9208A; 6 – набор постоянных магнитов; 7 – кнопка включения источника питания датчика Холла

Рисунок 3.3 – Схема экспериментальной установки

### **3.3 Порядок выполнения работы**

3.3.1 Провести калибровку датчика Холла и измерить индукцию различных постоянных магнитов.

Собрать экспериментальную установку по схеме, приведенной на рисунке 3.3. Для этого подключить источник питания Б5-44 к соленоиду. Мультиметр установить на измерение напряжения постоянного тока на шкалу 200 мВ. Установить датчик Холла, который приклеен на торец стержня, в центре соленоида. Начиная с тока 50 мА провести измерения ЭДС Холла для разных значений тока соленоида (до 300 мА). Ток устанавливается на декадном переключателе источника. При включенном индикаторе «Ток» через нагрузку протекает ток, величина которого соответствует декадному переключателю. Измерения проводятся при нажатой кнопке источника питания датчика Холла, которая закреплена на его корпусе.

Рассчитать значение индукции магнитного поля внутри соленоида для разных значений тока соленоида  $I$  по формуле

$$B = \mu_0 n I = 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 9333 \cdot I = 1,17 \cdot 10^{-2} I \text{ Тл.}$$

В этой формуле число  $n = 9333 \text{ м}^{-1}$  представляет число витков соленоида на единицу длины.

По результатам проведенных измерений построить график зависимости показаний мультиметра от индукции магнитного поля внутри соленоида. По этой зависимости определить постоянную датчика Холла в теслах на вольт.

По результатам калибровки измерить индукцию магнитного поля на поверхности кольцевых магнитов из набора.

3.3.2 Экспериментально построить зависимость индукции постоянного магнита от расстояния для одного из магнита, предложенного преподавателем.

### **Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, схему экспериментальной установки, графики градуировочной характеристики и зависимости индукции от расстояния, результаты измерений постоянной датчика Холла и индукции магнитов, выводы.

### **Контрольные вопросы**

1 Какие типы измерительных гальваномагнитных преобразователей вам известны?

2 На каком физическом принципе основана работа гальваномагнитных преобразователей?

3 Чем отличается магнитодиод от обычного диода?

4 Чем отличается магниторезистор от обычного резистора?

5 Чем отличается датчик Холла от магниторезистора и магнитодиода?

## 4 Изучение измерительных преобразователей для теплового контроля

**Цель работы:** изучить основные физические закономерности и конструктивные особенности построения измерительных преобразователей для теплового неразрушающего контроля; экспериментально исследовать градуировочную характеристику пироэлектрического приемника излучения МГ-30.

### 4.1 Основные теоретические положения

В зависимости от принципа действия существуют следующие приборы для измерения температуры [5].

1 Термометры расширения, основанные на изменении объема жидкости или линейных размеров твердых тел при изменении температуры.

2 Манометрические термометры, основанные на изменении давления при постоянном объеме при изменении температуры.

3 Термометры сопротивления, основанные на изменении сопротивления проводников и полупроводников при изменении температуры.

4 Болотметры – термометры сопротивления, предназначенные для измерения ИК-излучения.

5 Термоэлектрические термометры, основанные на изменении термоэлектродвижущей силы термопары при изменении температуры.

6 Термоэлементы – термоэлектрические термометры, предназначенные для измерения ИК-излучения.

7 Пирометры излучения – приборы, предназначенные для регистрации излучения, из которых наибольшее распространение получили: яркостные (оптические), основанные на изменении яркости монохроматического потока излучения от температуры; цветовые, основанные на изменении распределения энергии в спектре теплового излучения тела; радиационные, основанные на измерении в зависимости от температуры полного потока излучения.

8 Акустооптические приемники, основанные на изменении давления газа при поглощении ИК-излучения.

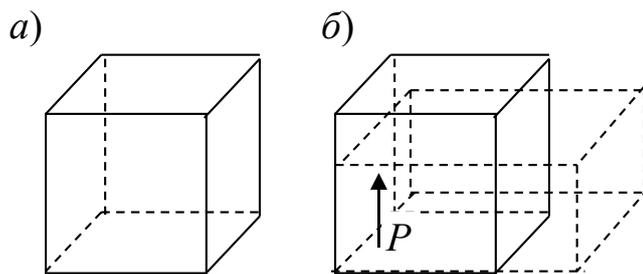
9 Пироэлектрические приемники, основанные на эффекте возникновения электрического заряда на поверхности некоторых полупроводников при их нагревании.

*Пироэлектрические приемники излучения.* В последние годы начал успешно применяться новый тип теплового неселективного приемника ИК-излучения – пироэлектрический. Особенностью пироэлектрических кристаллов является их спонтанная (самопроизвольная) поляризация при отсутствии внешних электрических полей. При постоянной температуре эта поляризация не может быть обнаружена по наличию поверхностных зарядов, т. к. эти заряды компенсируются поверхностной и объемной проводимостью кристалла. Но величина спонтанной поляризации зависит от температуры и при ее изменении на гранях кристалла, перпендикулярных полярной оси, заряды могут быть

обнаружены, т. к. в этом случае заряд не успевает компенсироваться. В этом и состоит пьезоэлектрический эффект. К пьезоэлектрическим классам принадлежат и сегнетоэлектрики (сегнетова соль и др.), но они характеризуются обратимой спонтанной поляризацией, которая проявляется в том, что при наличии поля, больше определенного (коэрцитивного), направление поляризации сегнетоэлектрика может быть изменено на противоположное.

У линейных же пьезоэлектриков никакие поля, вплоть до пробивных, не могут переполяризовать кристалл.

Для пьезоэлектрических кристаллов характерно наличие одного или нескольких фазовых переходов. Фазовый переход обычно характеризуется поглощением и выделением тепла и изменением объема, при этом одно состояние сменяется другим. У титаната бария, например, несколько фазовых переходов, но лишь один из них (при температуре Кюри) пьезоэлектрический. Выше  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  кристалл титаната бария принадлежит к центральносимметричному классу кубической системы (рисунок 4.1, *а*). Наличие центра симметрии приводит к тому, что эта фаза неполярная. При охлаждении кристалла титаната бария ниже точки Кюри его кубическая кристаллическая решетка переходит в тетрагональную (рисунок 4.1, *б*) и кристалл спонтанно поляризуется в направлении, обозначенном на рисунке 4.1, *б*.



*а* – кубическая (при температуре выше  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; *б* – тетрагональная (при температуре от  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Рисунок 4.1 – Элементарная кристаллическая ячейка двух фаз кристалла титаната бария

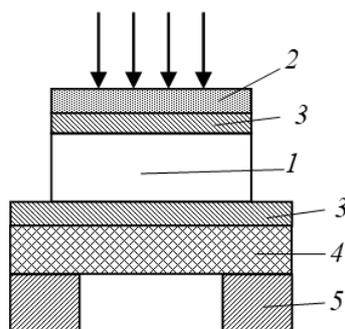
Если направление вектора поляризации  $P$  совпадает с направлением облучаемого приемника потока излучения, то такие приемники называются пьезоэлектрическими приемниками продольного типа, если вектор поляризации перпендикулярен потоку излучения, то – поперечного.

Обычно пьезоэлектрический приемник имеет конструкцию, приведенную на рисунке 4.2 [5].

Чувствительный элемент  $1$  представляет собой плоский слой толщиной  $40\text{...}100\text{ }\mu\text{м}$  керамики титаната бария с размерами приемной площадки  $1\text{...}20\text{ }\text{мм}^2$ . Распылением в вакууме на чувствительный элемент наносятся металлические электроды  $3$  толщиной  $0,1\text{ }\mu\text{м}$ . На облучаемый электрод напыляется слой золотой черни  $2$ , поглощающей излучение в широком спектральном диапазоне. Чувствительный элемент крепится на держателе с помощью растяжек из фосфористой бронзы толщиной  $20\text{...}30\text{ }\mu\text{м}$ . Держатель с

чувствительным элементом помещается в температурную кювету, подключаемую к термостату.

Пирозлектрические приемники работают принципиально только с модулированными лучистыми потоками.



1 – пирозлектрический кристалл; 2 – поглощающее покрытие; 3 – контакты; 4 – изолирующая подложка; 5 – опорное кольцо

Рисунок 4.2 – Схема конструкции пирозлектрического приемника

*Термоэлектрические термометры.* Первичным измерительным преобразователем термоэлектрического термометра (ТТ) служит термопара, которая состоит из двух разнородных проводников. Принцип действия термопары основан на образовании термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) в спае двух разнородных проводников, если их температура изменяется вдоль проводников. Термоэлектродные материалы, предназначенные для изготовления термопар, должны отвечать следующим условиям: не изменять с течением времени своих физических свойств, значение ТЭДС этих материалов выбирают достаточным для точных измерений, которое должно изменяться однозначно в зависимости от температуры; температурный коэффициент электросопротивления их должен быть, по возможности, минимальным, а электропроводность и теплопроводность – высокой [5].

Наиболее распространены два способа подключения термопары к измерительным преобразователям: простой и дифференциальный. В первом случае измерительный преобразователь подключается напрямую к двум термоэлектродам. Во втором случае используются два проводника с разными коэффициентами термоЭДС, спаянные в двух концах, а измерительный преобразователь включается в разрыв одного из проводников.

Для дистанционного подключения термопар используются удлинительные или компенсационные провода. Удлинительные провода изготавливаются из того же материала, что и термоэлектроды, но могут иметь другой диаметр. Компенсационные провода используются в основном с термопарами из благородных металлов и имеют состав, отличный от состава термоэлектродов.

К материалам для термоэлектродов термопар предъявляются большие требования. Основным требованием является создание сравнительно большой термоЭДС (в паре с другим материалом), чем больше термоЭДС, тем менее

чувствительным может быть вторичный прибор. В качестве сравнительного термоэлектрода (или, как говорят, нормального электрода) в настоящее время принят термоэлектрод из платины.

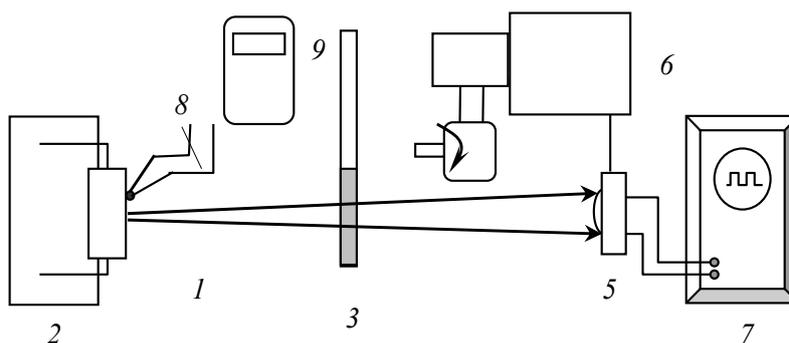
В зависимости от материала электродов термопары, получившие практическое применение, разделяются на две основные группы: термопары из благородных металлов и термопары из неблагородных металлов.

Из серийно выпускавшихся термопар к первой группе относятся две термопары: платинородий-платиновая термопара типа ТПП (обозначение градуировки по ГОСТ 6616-61ПП-1) и платинородий-платинородиевая.

Конструктивное выполнение термопар определяется выбором материала защитной трубы (арматуры) и изоляции. Защитная арматура должна оградить термопару от действия горячих, химически агрессивных газов, разрушающих термопару. Поэтому арматура термопары должна быть газонепроницаемой, механически стойкой, жароупорной и вместе с тем хорошо проводить тепло. Для защиты термопар из неблагородных металлов применяются стальные трубы без шва (при температурах измерения до 600 °С) и из нержавеющей стали (при измерении температуры до 1100 °С). Для защиты термопар из благородных металлов применяются кварцевые и фарфоровые трубы. Рабочие концы термопар соединяют спайкой или сваркой, в остальных частях термоэлектроды должны быть изолированы друг от друга. Термоэлектроды изолируются асбестом, когда предел измерения не более 300 °С, кварцевыми трубами или бусами (при  $t$  до 1000 °С), фарфоровыми трубками или бусами (при  $t$  до 1300...1400 °С).

#### 4.2 Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 4.3.



1 – нагреватель; 2 – источник питания нагревателя Б5-47; 3 – модулятор; 4 – блок питания электродвигателя модулятора; 5 – пироэлектрический приемник излучения МГ-30; 6 – источник питания приемника излучения; 7 – осциллограф; 8 – термопара; 9 – цифровой мультиметр DT-9208А

Рисунок 4.3 – Схема экспериментальной установки

В качестве нагревателя 1 в работе применяется сопротивление типа МЛТ, по которому пропускается ток от стабилизированного источника Б5-47 (2).

Инфракрасное излучение от нагретого сопротивления модулируется механическим модулятором 3, представляющим собой крыльчатку, установленную на оси электродвигателя, управляемого блоком питания 4. Затем ИК-излучение направляется на пироэлектрический приемник МГ-30 (5), установленном на электронной плате. Приемник излучения подключен к источнику питания 6. Электрический сигнал с выхода МГ-30 регистрируется на экране осциллографа С1-65 (7). Контроль температуры нагретого сопротивления проводится с помощью термопары 8, входящей в комплект цифрового мультиметра 7, с помощью которого измеряется температура.

### ***4.3 Порядок выполнения работы***

4.3.1 Экспериментально исследовать градуировочную характеристику пироэлектрического приемника излучения МГ-30.

Собрать экспериментальную установку по схеме рисунка 4.3. На боковой поверхности нагревателя с помощью пластинчатой пружины закрепить спай термопары. Начинать измерения необходимо с комнатной температуры при отсутствии нагрева сопротивления от источника. Измерения проводить при увеличении тока нагревателя от нуля до 300 мА через 50 мА. Измерение температуры проводить, когда она перестанет изменяться при установленном токе нагревателя (примерно через 2 мин после включения тока).

После измерения температуры при максимальном токе отключить ток и провести измерения при остывании нагревателя.

По результатам измерения построить соответствующие графики.

### ***Содержание отчета***

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, схему экспериментальной установки, графики градуировочной характеристики пироэлектрического преобразователя МГ-30 при нагревании и остывании сопротивления соответственно, выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 На каких физических принципах основано измерение температуры?
- 2 Чем отличаются измерительные термопреобразователи от термоиндикаторов?
- 3 Какие типы измерительных термопреобразователей вам известны?
- 4 На каких физических эффектах основана работа измерительных термопреобразователей?
- 5 На чем основан термоэлектрический эффект?
- 6 На чем основан пироэлектрический эффект?
- 7 Для чего необходимо использовать модуляцию излучения при работе пироэлектрических приемников излучения?
- 8 Что такое термоэлементы?

9 Что такое болометры?

10 Какие типы пирометрических измерительных преобразователей вам известны?

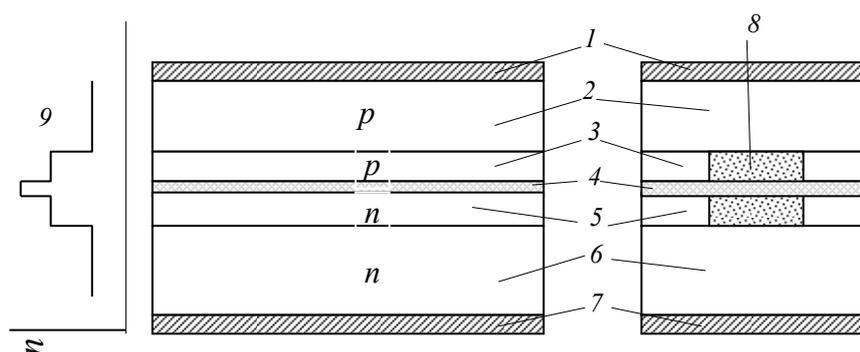
## 5 Изучение ватт-амперных характеристик полупроводниковых лазеров и светодиодов

**Цель работы:** изучить особенности работы полупроводниковых источников излучений; экспериментально исследовать особенности ватт-амперных характеристик полупроводниковых лазеров и светодиодов.

### 5.1 Основные теоретические положения

Самым миниатюрным типом современных лазеров являются *полупроводниковые лазеры*, размеры активной среды которых не превышают 1 мм. С точки зрения электронного строения такой лазер представляет собой полупроводниковый диод. Их часто и называют лазерные диоды. Его накачку осуществляют путем пропускания электрического тока через  $p$ - $n$ -переход лазерного диода в прямом направлении. Лазерный резонатор образован может быть сколами самого полупроводникового кристалла, поэтому полупроводниковые лазеры самые компактные. Современный лазер с непрерывной мощностью в несколько милливатт может работать непрерывно в течение нескольких лет без заметных изменений своих характеристик [5, 6].

Самым распространенным типом полупроводниковых лазеров являются лазеры на двойной гетероструктуре, схема строения которого приведена на рисунке 5.1.



1, 7 — металлические контакты; 2 — полупроводниковый слой  $p$ -типа; 3 — слой полупроводника  $p$ -типа с более высоким показателем преломления (гетер); 4 — области  $p$ - $n$ -перехода; 5 — слой полупроводника  $n$ -типа с более высоким показателем преломления (второй гетер); 6 — слой полупроводника  $n$ -типа; 8 — полосок; 9 — распределение показателя преломления в двойной гетероструктуре

Рисунок 5.1 — Схема строения полупроводникового лазера на двойной гетероструктуре

Гетероструктура представляет собой контакт двух полупроводников с различной шириной запрещенной зоны. Отличительной особенностью их строения является то, что область  $p$ - $n$ -перехода окружена слоем с показателем преломления большим, чем окружающие слои. Другими словами, эта область представляет собой оптический волновод, по которому распространяется генерируемое в  $p$ - $n$ -переходе излучение. Благодаря этому улучшаются энергетические характеристики лазеров.

Основной материал для изготовления полупроводниковых лазеров – это арсенид галлия. Но применяются также и другие материалы, такие как сернистый свинец, сернистый кадмий, теллуристый кадмий, сернистый цинк. Коэффициент полезного действия полупроводниковых лазеров может достигать до 70 % (для непрерывных лазеров реальный КПД составляет 20 %).

Фотометрическое тело излучения полупроводникового лазера на двойной гетероструктуре имеет две ортогональные плоскости симметрии. Раскрыв диаграммы направленности в плоскости, перпендикулярной плоскости  $p$ - $n$ -перехода, составляет угол порядка  $60^\circ$  по уровню половинной интенсивности, а в плоскости  $p$ - $n$ -перехода –  $20^\circ$ . Широкая диаграмма направленности является главным недостатком полупроводниковых лазеров. В настоящее время созданы достаточно мощные полупроводниковые лазеры, излучающие с одного полоска мощность порядка 1 Вт. Такие лазеры могут быть собраны в пакеты, содержащие несколько сотен лазерных диодов с суммарной мощностью в несколько сотен ватт, которые применяются для накачки твердотельных лазеров.

Выпускаются лазеры с разными длинами волн от голубого цвета до длин несколько сотен микрометров. Но наиболее эффективными и надежными являются лазеры на основе арсенида галлия, работающие в области 0,98 мкм.

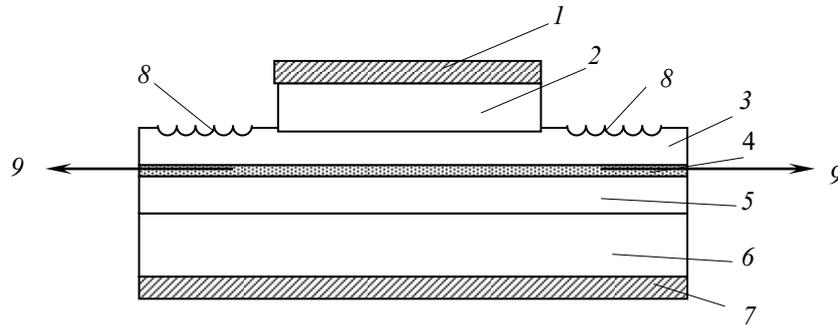
Дальнейшее повышение мощности излучения, КПД и надежности полупроводниковых лазеров связывают с развитием технологии изготовления сверхтонких высокооднородных кристаллических слоев полупроводниковых материалов (сверхрешеток), в которых резко уменьшается число дефектов и их подвижность. Малое число дефектов повышает оптическую прочность материала и, следовательно, максимально возможную мощность лазера.

Технология изготовления полупроводниковых лазеров позволила создать лазер с распределенной обратной связью (РОС), генерирующий на одной частоте, и используемый в качестве источника для оптических линий связи. Схема такого лазера приведена на рисунке 5.2.

Отражателями в этом лазере являются дифракционные решетки  $\delta$ , вытравленные на поверхности волноводного слоя гетеролазера. Период решеток определяет длину волны генерируемого излучения. Отражение на решетках получается за счет обратного брэгговского рассеяния генерируемого излучения.

*Светодиоды.* Более широкое применение в оптическом приборостроении, по сравнению с лазерными источниками, находят *светодиоды*. Принцип их работы, как и полупроводниковых лазеров, основан на рекомбинации

электронов и дырок в области  $p$ - $n$ -перехода, образованного в полупроводниковом материале, в результате чего генерируются кванты излучения [5–7].



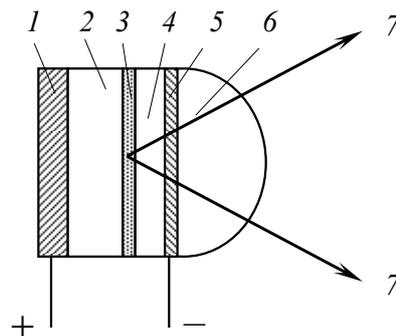
1, 7 – металлические контакты; 2 – полупроводниковый слой  $p$ -типа; 3 – слой полупроводника  $p$ -типа с более высоким показателем преломления (гетер); 4 – область  $p$ - $n$ -перехода; 5 – слой полупроводника  $n$ -типа с более высоким показателем преломления (второй гетер); 6 – слой полупроводника  $n$ -типа; 8 – вытравленные на поверхности волноводного слоя дифракционные решетки; 9 – генерируемое излучение

Рисунок 5.2 – Схема полупроводникового РОС-лазера

По характеристике излучения светодиода разделяют на две группы: светодиоды с излучением в видимой части спектра и светодиоды с излучением в инфракрасной части диапазона.

Конструктивное оформление светодиодов также различное, однако чаще всего они выполняются в виде монокристалла полупроводника, в котором создан  $p$ - $n$ -переход; кристалл вмонтирован в стеклянный корпус-линзу, свободно пропускающую излучаемый свет.

Схема строения светодиода приведена на рисунке 5.3.



1 – металлический электрод; 2 – полупроводник  $p$ -типа; 3 – область  $p$ - $n$ -перехода; 4 – полупроводник  $n$ -типа; 5 – полупрозрачный электрод; 6 – линза; 7 – генерируемое излучение

Рисунок 5.3 – Схема светодиода

Из рисунка 5.3 видно, что светодиоды имеют более простое строение по сравнению с полупроводниковыми лазерами на двойной гетероструктуре. При пропускании тока через  $p$ - $n$ -переход в прямом направлении за счет прикла-

дывания напряжения питания к электродам 1 и 5 в  $p-n$ -переходе за счет электролюминесценции возникает спонтанное излучение, длина волны которого определяется шириной запрещенной зоны используемого полупроводника. Часть этого излучения проходит через слой полупроводника 4 и полупрозрачный электрод 5 и выходит из светодиода. Так как полупроводниковые материалы, из которых изготавливаются светодиоды, имеют высокий показатель преломления порядка 3–4, то часть излучения, генерированного в  $p-n$ -переходе, за счет полного внутреннего отражения на границе воздух–полупроводник не может выйти из полупроводника. Поэтому на полупрозрачном контакте образуется полусферическая линза, для уменьшения относительного показателя преломления и для формирования пучка генерируемого излучения. Чаще всего наряду с линзой используют зеркальный отражатель для коллимирования генерируемого пучка с малой расходимостью. В этом случае расходимость по половинному уровню интенсивности составляет порядка  $7^\circ$ . Если линза не рассчитывается специально, то расходимость излучения светодиода составляет порядка  $45^\circ$  по уровню половинной интенсивности.

Так как полупрозрачный электрод достаточно заметно поглощает излучение, то его изготавливают из сильно легированного полупроводника.

Площадь излучающей площадки обычных индикаторных светодиодов составляет порядка  $1 \text{ мм}^2$ . Но для использования светодиодов в качестве источников для волоконно-оптических линий связи разработаны светодиоды с малым поперечным размером светоизлучающей площадки. Такие светодиоды позволяют получать модулированное током излучение с частотой более 200 МГц.

Разработаны многоцветные светодиоды, содержащие расположенные друг над другом в виде сэндвича  $p-n$ -переходы, образованные в полупроводниках с разным значением ширины запрещенной зоны. Сверху располагается самый широкозонный полупроводник, а под ним – с меньшей шириной. Тогда излучение от всех  $p-n$ -переходов выводится наружу без заметного ослабления. В зависимости от их включения или режима работы они излучают свет в различных областях спектра и имеют управляемый цвет свечения. При этом используются или зависимость интенсивности отдельных частот излучения от тока  $p-n$ -перехода, или смешение излучений двух светодиодов, имеющих свечение разного цвета. Если использовать переходы, излучающие красный и зеленый свет соответственно, то, изменяя токи переходов, удастся менять цвет излучения от желто-зеленого до красно-желтого оттенка, а также получать чистые красный и зеленый цвета.

Создание синих светодиодов, построенных на основе полупроводниковых азотистых соединений, сделало возможным получение светодиодов белого свечения. Существует четыре способа получения белых светодиодов, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки.

Первый способ основан на том, что белый свет получается путем смешивания в определённой пропорции излучения красного, зелёного и синего светодиодов. Для каждого из светодиодов можно подобрать значения тока, соответствующие максимуму его внешнего квантового выхода излучения

(число излученных квантов на одну рекомбинировавшую пару «электрон – дырка»). Однако при этих токах и напряжениях интенсивности каждого цвета не будут соответствовать значениям, необходимым для создания белого цвета. Добиться этого можно путем изменения числа светодиодов каждого цвета, при этом источник состоит из многих диодов.

Второй способ – смешение синего излучения светодиода с излучением жёлто-зелёного люминофора.

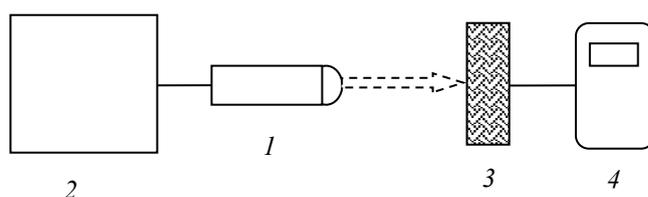
Третий способ – смешение синего излучения светодиода с излучением зелёного и красного люминофоров.

Эти два способа наиболее простые и в настоящее время наиболее экономичны. Люминофор наносится таким образом, что часть голубого излучения возбуждает люминофор, а часть проходит без поглощения. Толщина люминофора, форма держателя и пластикового купола подбираются так, чтобы излучение имело белое свечение в нужном телесном угле слоя желтого люминофора

Четвертый способ – смешение излучения трёх люминофоров (красного, зелёного и голубого), возбуждаемых ультрафиолетовым светодиодом. Данный способ использует технологии и материалы, которые разрабатывались для люминесцентных ламп. Однако этот способ связан с потерями энергии при преобразовании света от светодиода в люминофорах, т. к. спектр поглощения люминофоров не точно соответствует ультрафиолетовому спектру излучения светодиода.

## 5.2 Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 5.4.



1 – источник излучения; 2 – блок питания источника излучения; 3 – фотоприемная головка ваттметра поглощенной оптической мощности; 4 – индикаторный блок ваттметра поглощенной оптической мощности

Рисунок 5.4 – Схема экспериментальной установки

Свет от исследуемого источника излучения 1, который подключен к регулируемому стабилизированному блоку питания Б5-44 (2), направляется во входное окно фотоприемной головки 3 ваттметра поглощенной оптической мощности ОМЗ-65. Результат измерения мощности исследуемых источников излучения, в качестве которых используются полупроводниковый лазерный

модуль и три светодиода различного цвета (фиолетовый, синий и красный), регистрируется индикаторным блоком ваттметра поглощенной оптической мощности ОМЗ-65 (4).

### **5.3 Порядок выполнения работы**

5.3.1 Экспериментально изучить ватт-амперную характеристику полупроводникового лазерного модуля.

Собрать экспериментальную установку по схеме, приведенной на рисунке 5.4.

Установить декадный переключатель стабилизированного источника питания Б5-44 на напряжение 4,5 В, ток на 20 мА. Подключить полупроводниковый лазерный модуль к источнику питания, соблюдая при этом полярность (красный провод на «ПЛЮС» источника, бесцветный провод – на «МИНУС»).

**С разрешения преподавателя** включить источник Б5-44 в сеть и съюстировать лазерный луч таким образом, чтобы он практически полностью вводился во входное окно фотоприемной головки ваттметра поглощенной оптической мощности.

Включить в сеть ваттметр ОМЗ-65 и установить переключатель ваттметра на диапазон 10 мВт. Перекрыть лазерный пучок и выставить показания индикатора ваттметра на «НУЛЬ». При проведении измерений мощности генерации лазера при малых токах накачки перейти на более чувствительный диапазон, проводя на каждом из диапазонов подстройку на «НУЛЬ». Увеличивая постепенно ток с 20 до 35 мА с шагом 1 мА произвести измерения мощности генерации полупроводникового лазера лазерного модуля. Результаты измерений занести в таблицу и построить график ватт-амперной характеристики. По результатам графической зависимости определить пороговый ток накачки исследуемого полупроводникового лазера. Не устанавливать напряжение источника питания лазера более 4,5 В и ток накачки более 35 мА, т. к. полупроводниковые лазеры имеют очень высокую крутизну ватт-амперной характеристики, поэтому при превышении предельного тока накачки он выходит из строя.

5.3.2 Измерить ватт-амперную характеристику для светодиодов различного цвета.

Установить декадный переключатель стабилизированного источника питания Б5-44 на напряжение 4,5 В, ток на 2 мА. Подключить исследуемый светодиод к источнику питания, соблюдая при этом полярность (красный провод на «ПЛЮС» источника, бесцветный провод – на «МИНУС»). Столик со светодиодом придвинуть вплотную к фотоприемной головке ваттметра, чтобы линза светодиода частично вошла во входное окно фотоприемной головки ваттметра поглощенной оптической мощности.

Ступенчато увеличивая ток накачки светодиода через 2 мА провести измерение мощности света, излучаемого светодиодом. Результаты измерений занести в таблицу и по ним построить график ватт-амперной характеристики.

Аналогичные измерения провести для всех светодиодов.

## ***Содержание отчета***

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, схему экспериментальной установки, графики частотной и дисперсионных характеристик, выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Каким способом реализуется накачка инжекционных полупроводниковых лазеров?
- 2 Почему полупроводниковые лазеры полосковой конструкции имеют большую угловую расходимость?
- 3 Что собой представляют зеркала резонатора полупроводниковых лазеров?
- 4 К какому типу фотометрических тел относится фотометрическое тело инжекционного полупроводникового лазера полосковой конструкции?
- 5 Какая особенность конструкции резонатора полупроводникового РОС-лазера по сравнению с обычными?
- 6 За счет чего происходит излучение света в светодиодах и полупроводниковых инжекционных лазерах?
- 7 К какому типу фотометрических тел относится фотометрическое тело светодиодов?
- 8 Какие типы белых светодиодов вам известны?
- 9 В чем заключается физическая суть отличия работы светодиодов по сравнению с инжекционными полупроводниковыми лазерами?
- 10 Почему необходимо жестко контролировать величину тока накачки полупроводниковых лазеров?

## **6 Изучение характеристик фотоприемников**

***Цель работы:*** изучить характеристики фотоприемников; экспериментально исследовать особенности световых характеристик фотодиодов для вентильного и фотодиодного режимов включения.

### ***6.1 Основные теоретические положения***

Под характеристикой фотоприемника понимают изменение какого-либо параметра фотоприемника при изменении внешних факторов. Характеристика может быть выражена аналитической зависимостью, графиком или таблицей.

1 *Спектральной чувствительностью*  $S_\lambda$  называют реакцию фотоприемника на монохроматический поток излучения или световой поток [5–7].

$$S_{\lambda} = \frac{dI}{d\Phi_{e\lambda}} \left( \frac{\text{А}}{\text{Вт}} \right); \quad S_{\lambda} = \frac{dI}{d\Phi_{\nu\lambda}} \left( \frac{\text{А}}{\text{ЛМ}} \right); \quad S_{\lambda} = \frac{dI}{dE_{\nu\lambda}} \left( \frac{\text{А}}{\text{ЛК}} \right).$$

Для фоторезисторов  $S_{\lambda} = \frac{\Delta R_{\phi}}{R_{\phi}} \frac{1}{\Delta\Phi_{e\lambda}} \left( \frac{1}{\text{Вт}} \right)$ . Так как измерение абсолютной спектральной чувствительности трудно, то в расчетах используют относительную спектральную чувствительность  $S_{\lambda\text{отн}} = \frac{S_{\lambda}}{S_{\lambda\text{max}}}$ , где  $S_{\lambda\text{max}}$  – абсолютное максимальное значение спектральной чувствительности. По этой характеристике судят о диапазоне спектра, в котором может быть использован данный фотоприемник.

2 Под *переходной характеристикой фотоприемника* понимают реакцию фотоприемника на единичный скачок потока излучения во времени. Зависимость сигнала от времени  $S_{\text{п}}(t)$  называется переходной характеристикой. Типичный вид переходной характеристики приведен на рисунке 6.1.

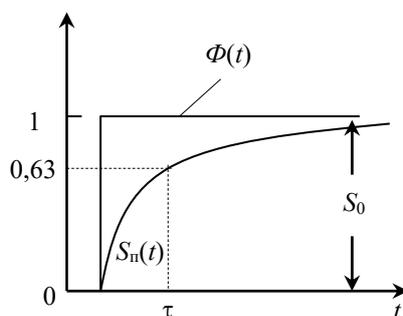


Рисунок 6.1 – Характерный вид переходной характеристики фотоприемника

Здесь  $\tau$  – постоянная времени, отсчитываемая от начального момента времени до того момента, когда сигнал возрастет до уровня 63 % от максимального.

3 Реакция приемника на единичный импульс потока излучения  $\Phi(t) = \delta(t)$  называют *импульсной характеристикой  $S_u(t)$  фотоприемника*. Под  $\delta$ -функцией  $\delta(t)$  понимают импульс единичной амплитуды, длительность которого бесконечно мала по сравнению с постоянной времени фотоприемника.

С помощью импульсной характеристики можно найти изменение тока (напряжения) при воздействии на фотоприемник потока излучения любой формы. На рисунке 6.2 приведена импульсная характеристика для прямоугольного импульса.

Обычно время нарастания равно времени спада импульса ( $\tau_{\text{нарастания}} = \tau_{\text{спада}}$ ). Если это не так, то постоянная времени зависит от падающего на фотоприемник потока излучения. Постоянная времени фотоприемника характеризует его быстродействие. Но его быстродействие также зависит и от схемы включения, температуры, характера излучения.

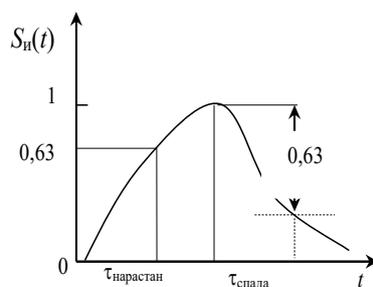


Рисунок 6.2 – Вид импульсной характеристики для прямоугольного импульса

4 Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) фотоприемника называют зависимость его чувствительности от частоты модуляции, падающего на фотоприемник излучения. Вид частотной характеристики изменяется от вида модуляции потока излучения. Например, для фотоприемника, имеющего экспоненциальную зависимость выходного сигнала во времени, для синусоидальной модуляции частотная характеристика описывается выражением

$$\frac{I(\omega)}{I(\omega=0)} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}},$$

где  $\omega$  – циклическая частота,  $\omega = 2\pi f$ .

Частотная характеристика имеет вид, приведенный на рисунке 6.3.

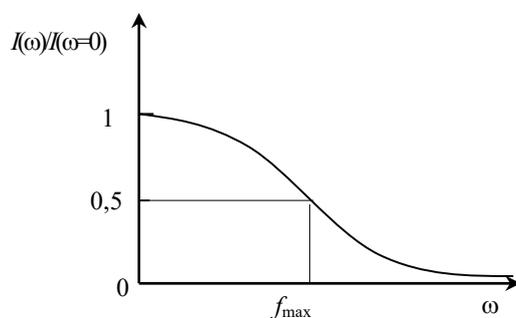


Рисунок 6.3 – Амплитудно-частотная характеристика

Для уверенной передачи модулированного сигнала частота модуляции не должна превышать максимально допустимой  $f_{\max}$ , которая удовлетворяет соотношению  $f_{\max} \cdot \tau \approx 0,3$ . Эта оценка справедлива для любого вида модуляции потока излучения.

Зависимость угла сдвига фазы гармонической составляющей выходного напряжения (тока) относительно соответствующей ей гармонической составляющей потока излучения называется *фазочастотной (ФЧХ) характеристикой*.

5 Под энергетической (световой) характеристикой фотоприемника понимают зависимость чувствительности (любой), фототока или напряжения от

величины падающего на фотоприемник излучения. Характерный вид световой характеристики приведен на рисунке 6.4.

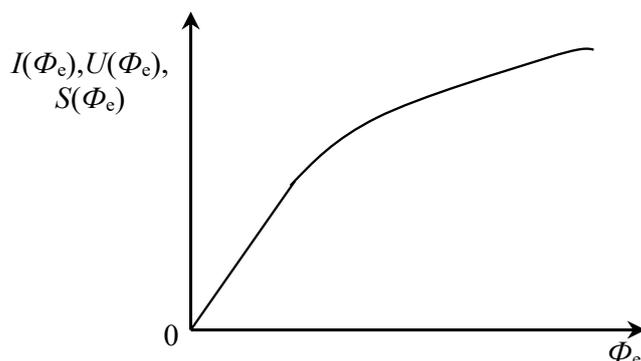


Рисунок 6.4 – Характерный вид световой характеристики

При малых потоках излучения характеристика линейна. По мере увеличения потока излучения наблюдается насыщение. По энергетической характеристике можно определить интегральную чувствительность по току или по напряжению при заданном уровне засветки фотоприемника, которые являются крутизной соответствующей характеристики.

Крутизна характеристики зависит не только от типа источника, но и от величины падающего на фотоприемник потока излучения. Таким образом, можно определить чувствительность фотоприемника для любого источника, для которого известна световая характеристика.

6 *Апертурной характеристикой* называют зависимость сигнала фотоприемника от угла падения излучения на фотоприемник. Она дает возможность осуществить пространственное согласование фотоприемника с оптической системой.

7 *Вольт-амперная характеристика* определяет зависимость тока фотоприемника от величины приложенного питающего напряжения. Для каждого типа фотоприемника она имеет свой, характерный для данного приемника, вид, но для любого фотоприемника на вольт-амперной характеристике имеется линейный участок, на котором обычно выбирается рабочая точка.

8 *Вольтовы характеристики* отражают связь между чувствительностью, шумом, пороговым потоком и другими параметрами фотоприемника в зависимости от питающего приемник напряжения. Так как с увеличением питающего напряжения растут как интегральная чувствительность, так и шумы, то для обеспечения оптимальных условий работы фотоприемника величина питающего напряжения должна подбираться с учетом всех факторов. Чтобы при проведении расчетов исключить зависимость чувствительности от величины питающего напряжения, пользуются понятием удельной чувствительности, относя ее к напряжению 1 В.

9 *Температурные характеристики* отражают зависимость параметров фотоприемника от температуры светочувствительного слоя.

10 *Спектр мощности шума (спектр плотности шума)* – зависимость, описывающая распределение дисперсии шума по частотам. Типичный вид зависимости спектра мощности шума для полупроводниковых фотоприемников приведен на рисунке 6.5.

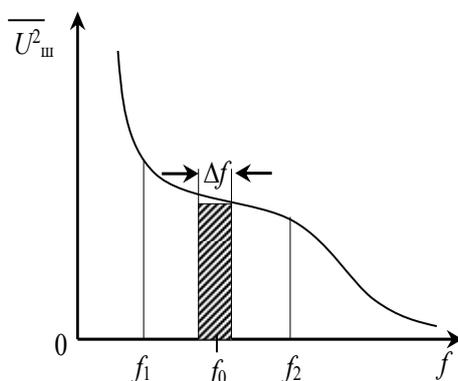
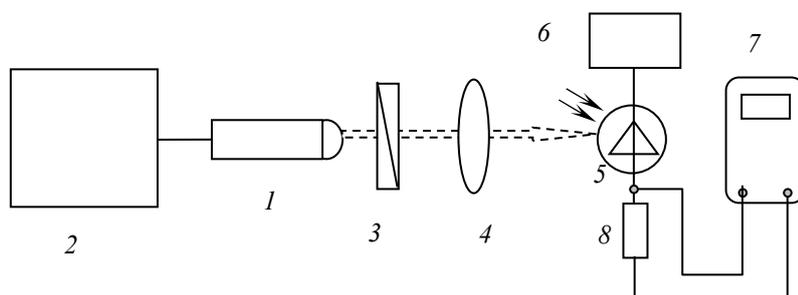


Рисунок 6.5 – Типичный вид спектра мощности шума полупроводниковых фотоприемников

Зная подобные характеристики для конкретных фотоприемников, можно выбрать частоту модуляции сигнала и полосу пропускания регистрирующего устройства так, чтобы уменьшить влияние собственных шумов фотоприемника на чувствительность прибора. С точки зрения уменьшения уровня шумов, определяемых в полосе  $\Delta f$ , целесообразно увеличивать рабочую частоту модуляции  $f_0$  и уменьшать полосу пропускания системы  $\Delta f$ . С этой целью широко применяются селективные усилители, настроенные на частоту модуляции потока излучения.

## 6.2 Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 6.6.



1 – полупроводниковый лазер; 2 – блок питания полупроводникового лазера; 3 – поляризатор; 4 – линза; 5 – исследуемый фотоприемник; 6 – блок питания фотодиодов; 7 – цифровой мультиметр; 8 – нагрузочное сопротивление

Рисунок 6.6 – Схема экспериментальной установки

Установка работает следующим образом. Излучение полупроводникового лазерного модуля МЛР-2670 (1), подключенного к блоку питания 2, проходит

через пленочный поляризатор 3 и попадает на линзу 4, с помощью которой лазерное излучение фокусируется на светочувствительной площадке исследуемого фотоприемника 5, в качестве которого в работе используются кремниевый фотодиод ФД-256, германиевый фотодиод ФД-6Г и фотосопротивление ФСЗ-1. Для фотодиодного режима включения исследуемых фотодиодов применяется блок питания 6, выходное напряжение которого равно 5 В постоянного тока. Для регистрации электрического сигнала с выхода фотодиодов применяется цифровой мультиметр DT-9208A (7). В фотодиодном режиме работы фотодиодов электрический сигнал снимается с нагрузочного сопротивления 8, включенного последовательно с фотодиодом. При включении фотодиодов в вентильном режиме мультиметр подключается к аноду и катоду фотодиода непосредственно с помощью двухпроводного кабеля с клеммными зажимами на одном конце провода.

При изучении световой характеристики фотосопротивления производится измерение его сопротивления с помощью мультиметра при различных значениях потока излучения, падающего на фотосопротивление.

Величина максимального потока излучения, генерируемого используемым в работе лазерным модулем, приведена в надписи на его корпусе.

### **6.3 Порядок выполнения работы**

6.3.1 Экспериментально изучить световую характеристику для прилагаемых фотодиодов при фотодиодном режиме их включения.

Для этого необходимо собрать экспериментальную установку по схеме, приведенной на рисунке 6.6.

Поляризатор установить на нулевую отметку. Исследуемый фотодиод закрепить на юстировочном столике и установить его так, чтобы расстояние от линзы до торца цилиндрической трубки, в которой закреплен фотодиод, было примерно 10 см. Это необходимо для того, чтобы сфокусированное пятно лазерного луча полностью попадало на светочувствительную площадку фотодиода. Переключатель рода работы мультиметра выставить на измерение напряжения постоянного тока на диапазон 20 В. Измерительные провода мультиметра подключить к выводам нагрузочного сопротивления цепи фотодиода. Провода от фотодиода соединить скруткой с проводами соответствующего цвета источника питания фотодиода.

**С разрешения преподавателя** включить в сеть источник питания полупроводникового лазерного модуля и источник питания фотодиода. Все элементы оптической системы установить по лазерному лучу таким образом, чтобы получить максимальный электрический сигнал на выходе фотодиода. Затем измерить величину сигнала на выходе фотодиода при различных углах поворота поляризатора и результаты измерения занести в таблицу. (Поворот угла поляризатора производить через  $10^\circ$  от  $0^\circ$  до  $60^\circ$ , а дальше до  $90^\circ$ , через  $5^\circ$ .) Для каждого угла поворота поляризатора рассчитать по закону Малюса соответствующий поток излучения на выходе поляризатора

$$\Phi_e(\varphi) = \Phi_{e0} \cos^2 \varphi,$$

где  $\varphi$  – угол поворота поляризатора.

Результаты расчета потока излучения также занести в таблицу. По результатам измерений построить световую характеристику исследуемого фотодиода.

Провести аналогичные измерения для второго фотодиода.

6.3.2 Экспериментально изучить световую характеристику для прилагаемых фотодиодов при вентильном режиме их включения.

Из собранной установки для выполнения первого упражнения отключить источник питания фотодиода от сети, от фотодиода и от мультиметра. К фотодиоду подсоединить мультиметр через двухпроводной кабель. Провести аналогичные измерения, как для первого упражнения. Результаты измерений занести в соответствующую таблицу и по результатам измерений построить световую характеристику для каждого фотодиода.

6.3.3 Экспериментально построить световую характеристику для фотосопротивления.

Исследуемое фотосопротивление установить вместо фотодиода в схеме экспериментальной установки из рисунка 6.6. Мультиметр установить на измерение сопротивления и подключить его к фотосопротивлению. Диапазон установки переключателя выбирать на основе экспериментальных измерений. Результаты измерений занести в таблицу и по результатам измерений построить световую характеристику в виде зависимости сопротивления фоторезистора от величины падающего на него потока излучения.

### ***Содержание отчета***

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, схему экспериментальной установки, графики световых характеристик для фотодиодов и фотосопротивления, выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Чем отличается характеристика фотоприемника от его параметра?
- 2 Каким образом может быть выражена характеристика фотоприемника?
- 3 Что объединяет переходную, импульсную и частотную характеристики фотоприемников?
- 4 Зависит ли вид частотной характеристики фотоприемника от вида модуляции регистрируемого излучения?
- 5 Связаны ли между собой интегральная и спектральная чувствительности фотоприемника?
- 6 Будет ли отличаться чувствительность фотоприемника при различных потоках регистрируемого им излучения?
- 7 Какие режимы включения фотодиодов вам известны?

- 8 В каком случае фотодиод является параметрическим преобразователем?  
 9 В каком случае фотодиод является генераторным преобразователем?  
 10 Что общего между фоторезистором и фотодиодом?

## 7 Изучение амплитудно-частотных характеристик пьезопреобразователей

**Цель работы:** изучить характеристики пьезопреобразователей, экспериментально исследовать особенности амплитудно-частотных характеристик пьезопреобразователей.

### 7.1 Основные теоретические положения

Основные электроакустические свойства пьезопреобразователей характеризуются следующими параметрами: передаточные функции, электрические сопротивления, временные характеристики и параметры акустического поля. Кроме этого важное эксплуатационное значение имеют такие характеристики как стабильность акустического контакта, износостойкость, рабочий диапазон температур [5, 8].

*Передаточная функция преобразователя* – это комплексное отношение двух функций от частоты: выходного сигнала преобразователя ко входному сигналу при определенных электрической и акустической нагрузках преобразователя.

В режиме излучения входным сигналом являются электрическое напряжение  $U_{и}$  или сила тока  $I_{и}$ , а выходными – механическое напряжение или давление  $P_{и}$ . Поэтому передаточные функции режима излучения имеют следующий вид:

$$\bar{K}_{PU} = \frac{P_{и}}{U_{и}}; \bar{K}_{PI} = \frac{P_{и}}{I_{и}}. \quad (7.1)$$

В режиме приема входным сигналом является упругое напряжение или давление  $P_{п}$  в падающей акустической волне, а выходными – электрическое напряжение  $U_{п}$  или ток  $I_{п}$ . Поэтому передаточные функции режима приема имеют вид:

$$\bar{K}_{UP} = \frac{U_{п}}{P_{п}}; \bar{K}_{IP} = \frac{I_{п}}{P_{п}}. \quad (7.2)$$

В совмещенном режиме, когда один и тот же преобразователь является одновременно и излучающим и приемным, входными сигналами являются  $U_{и}$

и  $I_{\text{и}}$ , а выходными –  $U_{\text{п}}$  и  $I_{\text{п}}$ . Поэтому для совмещенного режима имеют место следующие передаточные функции:

$$\bar{K}_{UU} = \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{и}}}; \bar{K}_{UI} = \frac{U_{\text{п}}}{I_{\text{и}}}; \bar{K}_{IU} = \frac{I_{\text{п}}}{U_{\text{и}}}; \bar{K}_{II} = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{и}}}. \quad (7.3)$$

Параметры  $P_{\text{и}}$  и  $P_{\text{п}}$  могут быть определены в какой-то точке пространства или как среднее значение на поверхности преобразователя.

Параметры  $U_{\text{и}}$  и  $I_{\text{и}}$  определяют в условиях холостого хода или короткого замыкания.

Передаточные функции совмещенного режима характеризуют работу как преобразователей совмещенного типа, так и отдельного типа, когда из них образуется пара источник–приемник. Если параметры  $P_{\text{и}}$  и  $P_{\text{п}}$  определены таким образом, что  $P_{\text{и}} = P_{\text{п}}$ , то в совмещенном режиме работы

$$\bar{K}_{UU} = \bar{K}_{PU} \bar{K}_{UP}; \bar{K}_{UI} = \bar{K}_{PI} \bar{K}_{UP}; \quad (7.4)$$

$$\bar{K}_{IU} = \bar{K}_{PU} \bar{K}_{IP}; \bar{K}_{II} = \bar{K}_{PI} \bar{K}_{IP}. \quad (7.5)$$

Любую из передаточных функций можно представить в комплексном виде

$$\bar{K}_{l,m}(\omega) = |\bar{K}_{l,m}(\omega)| e^{j\varphi(\omega)}, \quad (7.6)$$

где  $\varphi(\omega)$  – фаза передаточной функции;

$l, m$  – индексы, соответствующие обозначению давления, напряжения или тока.

Комплексный характер передаточной функции обусловлен фазовым сдвигом между входным и выходным сигналами пьезопреобразователя.

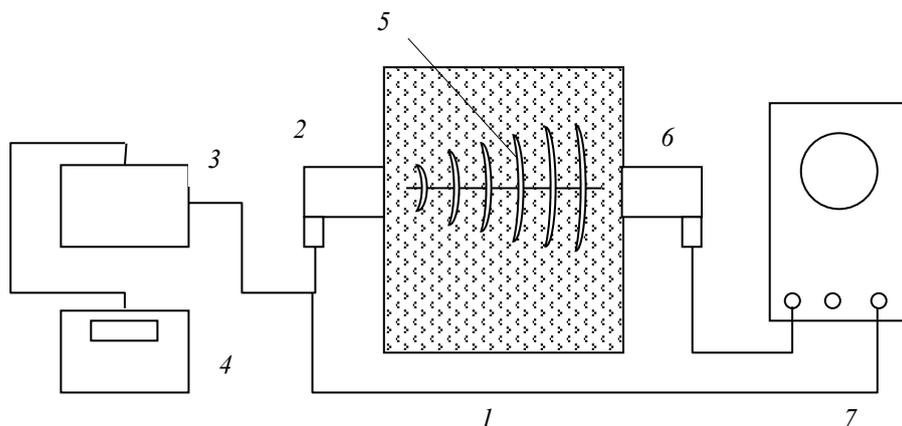
Значение передаточной функции на определенной частоте называется *коэффициентом передачи*. На практике наибольшее значение имеет модуль передаточной функции, нормированный на максимальное значение. Его зависимость от частоты называется *амплитудно-частотной характеристикой* (АЧХ).

Зависимость сдвига фаз между выходным и входным сигналами называется *фазочастотной характеристикой* (ФЧХ).

Частотный диапазон преобразователя в области рабочих частот с неравномерностью 6 дБ называют *полосой пропускания* пьезопреобразователя и обозначается  $\Delta f$  или  $\Delta\omega$ .

## 7.2 Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 7.1.



1 – стеклянный прямоугольный параллелепипед; 2 – излучающий пьезопреобразователь; 3 – электрический генератор синусоидальных колебаний ГЗ-112/1; 4 – частотомер ЧЗ-36; 5 – акустическая волна; 6 – приемный пьезопреобразователь; 7 – двухканальный осциллограф С1-118А

Рисунок 7.1 – Схема экспериментальной установки

Передающий акустический тракт выполнен в виде стеклянного прямоугольного параллелепипеда 1. С одной стороны параллелепипеда через слой контактной смазки (глицерин) установлен излучающий пьезопреобразователь 2, электрический синусоидальный сигнал на который поступает с генератора ГЗ-112/1 (3). Контроль частоты генератора производится с помощью электронного частотомера ЧЗ-36 (4). Акустическая волна 5, генерируемая излучающим пьезопреобразователем, распространяется по параллелепипеду и регистрируется приемным пьезопреобразователем 6, установленным через слой контактной смазки на параллелепипеде напротив излучающего пьезопреобразователя. Излучающий и приемный пьезопреобразователи закрепляются на стенках параллелепипеда с помощью кольцевой резиновой тесьмы. Электрический сигнал с выхода приемного пьезопреобразователя регистрируется на экране двухканального осциллографа 8, на второй вход которого подается опорный синусоидальный электрический сигнал непосредственно от генератора.

В лабораторной работе используются пьезопреобразователи с резонансной частотой 5 МГц.

## 7.3 Порядок выполнения работы

7.3.1 Экспериментально измерить амплитудно-частотную характеристику прямых пьезопреобразователей.

Собрать экспериментальную установку по схеме, приведенной на рисунке 7.1. При этом на один вход осциллографа подключить выход с излу-

чающего пьезопреобразователя, а на другой – сигнал непосредственно с выхода генератора.

Переключатель диапазона частоты генератора 4 установить на частоту 2 МГц. С **разрешения преподавателя** включить генератор, частотомер и осциллограф в электросеть. Дать приборам прогреться 5 мин. Установить максимальную амплитуду синусоидального сигнала на выходе генератора, чтобы можно было уверенно наблюдать и измерить сигнал на экране осциллографа, принятый приемным пьезопреобразователем. Увеличивая частоту генератора через 200 кГц измерить амплитуду сигнала приемного пьезопреобразователя и опорного сигнала. Результаты измерения частоты и амплитуды сигналов занести в таблицу. Измерения проводить до частоты 9 МГц.

По результатам измерения построить график, нормированный на максимальное значение отношения сигнала на выходе приемного пьезопреобразователя к соответствующему значению выходного сигнала генератора. По построенному графику определить ширину полосы пропускания пьезопреобразователя.

### *Содержание отчета*

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, схему экспериментальной установки, график амплитудно-частотной характеристики, выводы.

### *Контрольные вопросы*

1 Какие параметры, характеризующие свойства пьезопреобразователей, вам известны?

2 В чем заключается комплексный характер передаточных функций пьезопреобразователей?

3 Что такое передаточная функция пьезопреобразователя?

4 Что собой представляет коэффициент передачи пьезопреобразователя?

5 Что такое амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) пьезопреобразователя?

6 Что такое фазочастотная характеристика (ФЧХ) пьезопреобразователя?

7 Что такое полоса пропускания частот пьезопреобразователя?

8 Чем можно объяснить сдвиг измеренной резонансной частоты используемого в работе пьезопреобразователя от ее паспортного значения?

9 Чем обусловлено нарушение плавного изменения сигнала приемного пьезопреобразователя при изменении частоты генератора?

10 Можно ли использовать для измерения АЧХ пьезопреобразователя вместо стеклянного параллелепипеда стальной стержень?

## 8 Изучение диаграммы направленности пьезопреобразователей

**Цель работы:** изучить особенности акустических полей излучающих пьезопреобразователей; экспериментально измерить диаграммы направленности прямого и наклонного пьезопреобразователей.

### 8.1 Общие теоретические положения

Под акустическим полем пьезопреобразователя обычно понимают распределение давления акустической волны в пространстве. Применительно к различного типа преобразователям различают поле излучения, поле приема и поле излучения-приема [5, 8].

*Поле излучения*  $I(a, B)$  преобразователя  $a$  определяет амплитуду и фазу акустических колебаний в некоторой точке пространства  $B$ .

*Поле приема*  $I(B, c)$  определяет амплитуду и фазу колебаний приемного преобразователя  $c$  при действии на него точечного ненаправленного сферического излучателя, находящегося в некоторой точке пространства  $B$ .

*Поле излучения-приема* определяет сигнал приемного преобразователя, возникающий в результате отражения излучения того же преобразователя от небольшого отражателя, расположенного в точке  $B$ .

Вблизи оси преобразователя (параксиальной области) поля излучения и приема идентичны.

Акустическое поле обусловлено размерами, расположением отражателя и преобразователя, частотой, колебательными свойствами среды и длительностью генерируемых импульсов. В упрощенной теории импульсы считаются длинными, следовательно, возбуждаемые упругие колебания можно считать гармоническими и непрерывными. Но с другой стороны, импульсы считаются достаточно короткими, поэтому процессы излучения, отражения и приема происходят в различные моменты времени. Из этого следует, что путь, проходимый импульсом, должен быть больше длины акустической волны. Влияние малой длительности импульса на акустическое поле учитывается с помощью поправок.

Характерный вид распределения давления акустической волны в пространстве вдоль оси круглой пьезопластинки приведен на рисунке 8.1.

Область, где наблюдаются осцилляции акустического поля ( $x < x_6$ ), называют *ближней зоной* пьезопреобразователя, а область монотонного убывания давления при ( $x > x_6$ ) – *дальней зоной*. Иногда выделяют промежуточную зону при ( $0,5x_6 < x < 2x_6$ ).

Размер ближней зоны  $x_6$  определяется следующим выражением

$$x_6 = \frac{a^2}{\lambda},$$

где  $a$  – радиус пьезопластины;  
 $\lambda$  – длина акустической волны.

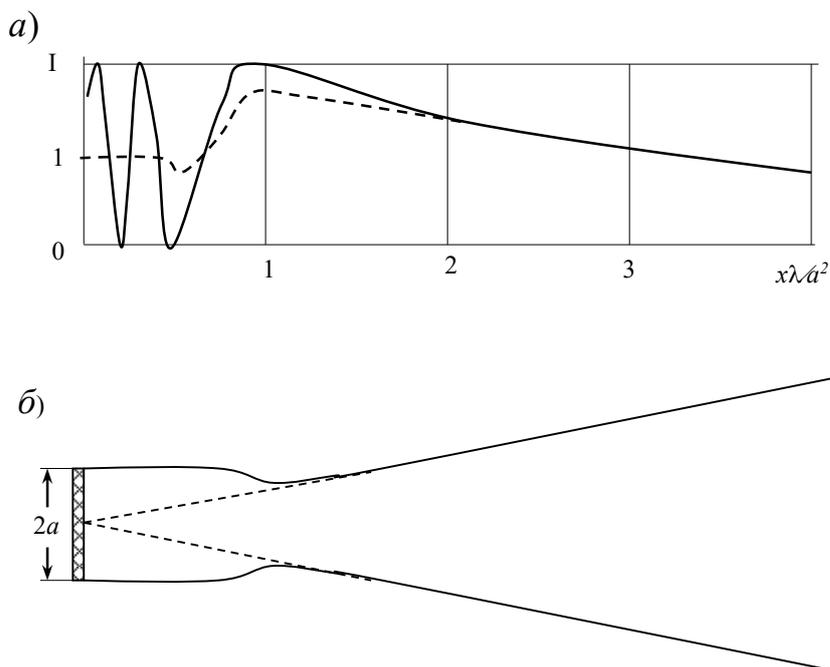


Рисунок 8.1 – Акустическое поле (по модулю) на оси дискообразного пьезопреобразователя (а) и схематическое распределение поля (б)

На рисунке 8.1, а штриховой линией изображено акустическое поле в случае излучения коротких акустических импульсов. Как видно из рисунка, в этом случае максимумы и минимумы заметно сглаживаются.

Образование максимумов и минимумов в ближней зоне обусловлено интерференцией акустических волн, возбуждаемых различными участками поверхности пьезопластины (зоны Френеля). Ближняя зона пьезопреобразователя характерна не только немонотонным изменением сигнала вдоль оси пьезопластины, но также наблюдаются осцилляции при смещении точки наблюдения от оси.

Среднее значение амплитуды давления на площади круга, равного площади пьезопреобразователя, соответствует давлению на поверхности пьезопластины  $P_0$  с погрешностью не более 20 %. Если построить лучевую трубку, опирающуюся на контур пьезопластины (см. рисунок 8.1, б), то 80 % энергии акустической волны в ближней зоне будет распространяться внутри этой трубки. Эти энергетические соображения лежат в основе схематического представления о ближней зоне преобразователя, как о параллельном пучке лучей. В области  $x \approx x_0$  энергия поля концентрируется вблизи оси преобразователя, т. е. наблюдается небольшая фокусировка излучения.

**Дальняя зона** пьезопреобразователя – это область акустического поля, где амплитуда давления монотонно убывает с увеличением расстояния от излучателя. Акустическое поле в этой зоне обычно представляется в виде

множителя, убывающего с расстоянием, и второго сомножителя, представляющего собой диаграмму направленности, которая представляется в виде лучей, исходящих из центра преобразователя, при этом длина этих лучей, пропорциональная амплитуде давления или интенсивности акустической волны, изменяется в зависимости от направления.

Значение давления в любой точке  $B$  в дальней зоне можно записать в следующем виде:

$$P(B) = \frac{P_0 S_a}{\lambda r} \cos^2 \frac{\theta_y}{2} \cos^2 \frac{\theta_z}{2} \Phi(\theta_y, \theta_z), \quad (8.1)$$

где  $\Phi(\theta_y, \theta_z)$  – диаграмма направленности;

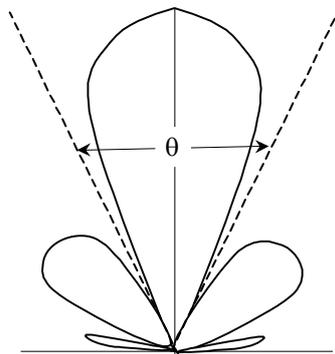
$\theta_y, \theta_z$  – углы между направлением на точку, в которой определяется давление и плоскостями координат  $XOY$  и  $XOZ$  соответственно.

Сомножители  $\cos^2 \frac{\theta_y}{2}$  и  $\cos^2 \frac{\theta_z}{2}$  учитывают уменьшение амплитуды продольной акустической волны, связанное с неперпендикулярностью поверхности излучателя направлению на рассматриваемую точку.

Если представить диаграмму направленности в сферических координатах, то в осевом сечении все диаграммы направленности имеют основной лепесток и ряд уменьшающихся боковых лепестков, как это видно на рисунке 8.2. Угол раскрытия основного лепестка соответствует наименьшему значению  $X$ , при котором  $\Phi = 0$ , и определяется формулой

$$\theta = \arcsin \frac{N\lambda}{a}, \quad (8.2)$$

где  $a$  – геометрический параметр преобразователя.



$\theta$  – угловая ширина основного лепестка диаграммы направленности

Рисунок 8.2 – Характерный вид диаграммы направленности акустического пьезопреобразователя

Для круглой пьезопластинки – это ее радиус, для эллиптической пластинки – полуось эллипса, для пластинки в виде тонкого кольца – наружный радиус кольца, для прямоугольной пластинки – полусторона прямоугольника.

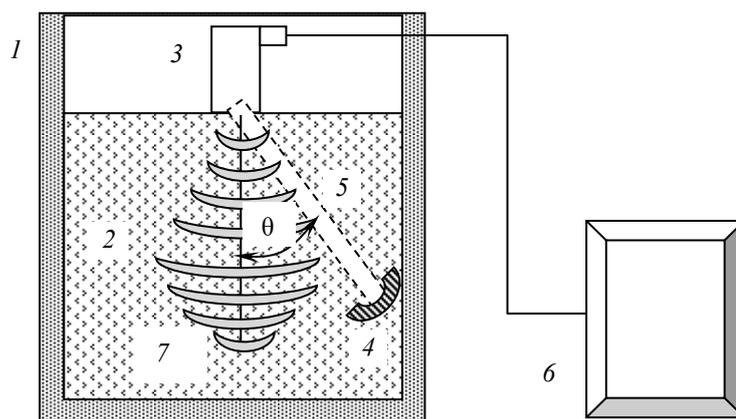
Для неосесимметричных преобразователей (эллиптического, прямоугольного) границы лепестка разные в двух сечениях, проходящих через плоскости  $XOY$  и  $XOZ$ . Коэффициент  $N$  зависит от формы пьезопреобразователя.

В случае излучения коротких акустических импульсов минимумы поля между лепестками сглаживаются. В некоторых случаях ширину основного лепестка диаграммы направленности определяют не по нулевому уровню, а по уровню 0,1.

Боковые лепестки являются источниками помех, при этом наибольший уровень помех соответствует первому боковому лепестку, имеющему максимальное значение.

## 8.2 Описание экспериментальной установки

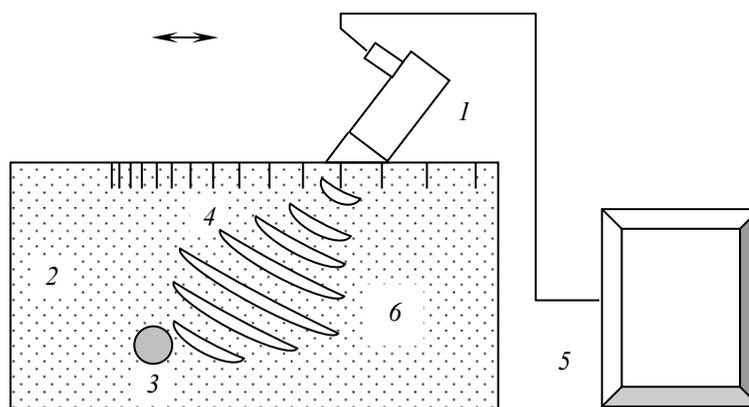
Схема экспериментальной установки для измерения диаграммы направленности прямых пьезопреобразователей приведена на рисунке 8.3.



1 – ванна в виде прямоугольного параллелепипеда; 2 – вода; 3 – совмещенный пьезопреобразователь; 4 – отражатель ультразвука; 5 – поворотная рамка; 6 – ультразвуковой дефектоскоп ГСП.УЗД-МВТУ; 7 – ультразвуковая волна

Рисунок 8.3 – Схема экспериментальной установки для измерения диаграммы направленности прямых пьезопреобразователей

Схема экспериментальной установки для измерения диаграммы направленности наклонных пьезопреобразователей приведена на рисунке 8.4.



1 – наклонный пьезопреобразователь; 2 – контрольный образец; 3 – отражатель ультразвука в виде цилиндрического отверстия; 4 – шкала для определения угла направления акустической волны; 5 – дефектоскоп; 6 – акустическая волна

Рисунок 8.4 – Схема экспериментальной установки для измерения диаграммы направленности наклонных пьезопреобразователей

### 8.3 Порядок выполнения работы

8.3.1 Измерение диаграммы направленности прямого пьезопреобразователя.

Собрать экспериментальную установку в соответствии со схемой рисунка 8.3. Залить в ванну воду до такого уровня, чтобы пьезопластина преобразователя оказалась в воде. С разрешения преподавателя включить и настроить дефектоскоп. Регулятором поворота рамки с отражателем ультразвука и регулятором ручной регулировки усиления выставить максимальную амплитуду отраженного строб-импульса (второй импульс на экране ЭЛТ). Переключателями ступенчатого ослабления сигнала установить амплитуду отраженного импульса примерно одно деление шкалы ЭЛТ. Затем повернуть рамку с отражателем ультразвука таким образом, чтобы при полностью выключенном ослаблении сигнала с помощью переключателей ступенчатого ослабления сигнала его амплитуда на экране ЭЛТ была примерно одно деление. (Регулятор ручной регулировки усиления нельзя трогать.) Значение угла поворота рамки с отражателем ультразвука и величину уровня ослабления сигнала в децибелах занести в таблицу отчета.

Поворачивая отражатель с шагом  $2^\circ$ , провести измерение ослабления сигнала для разных углов при их перестройке от отрицательных к положительным относительно угла, при котором наблюдается максимальное значение сигнала. По результатам измерения построить диаграмму направленности в полулогарифмическом масштабе в декартовой системе координат. По результатам измерений определить угол раскрытия основного лепестка диаграммы направленности.

После выполнения упражнения слить воду из ванны и отключить кабель от пьезопреобразователя.

8.3.2 Собрать экспериментальную установку в соответствии со схемой рисунка 8.4. Установить контрольный образец и нанести на его рабочую поверхность слой контактной смазки (глицерин). В соответствии с углом ввода пьезопреобразователя установить его на соответствующее деление на шкале контрольного образца. В этом положении регулятором ручной регулировки усиления выставить максимальную амплитуду отраженного строб-импульса. Переключателями ступенчатого ослабления сигнала установить амплитуду отраженного импульса примерно одно деление шкалы ЭЛТ. Затем, перемещая пьезопреобразователь влево и вправо по шкале контрольного образца от деления шкалы, на котором наблюдается максимальный отраженный сигнал, измерить диаграмму направленности в полулогарифмическом масштабе для наклонного акустического преобразователя. Измерения отраженного от цилиндрического отверстия внутри контрольного образца проводить таким образом, чтобы при полностью выключенном ослаблении сигнала с помощью переключателей ступенчатого ослабления сигнала его амплитуда на экране ЭЛТ была примерно одно деление. (Регулятор ручной регулировки усиления нельзя трогать.) По результатам измерения построить диаграмму направленности в полулогарифмическом масштабе в декартовой системе координат. По результатам измерений определить угол раскрытия основного лепестка диаграммы направленности.

После выполнения упражнения разобрать экспериментальную установку и вытереть контактную смазку с поверхности контрольного образца.

### ***Содержание отчета***

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, схему экспериментальной установки, графики диаграмм направленности для прямого и наклонного пьезопреобразователей, выводы.

### ***Контрольные вопросы***

1 Чем вызвано деление акустического поля пьезопреобразователей на ближнюю и дальнюю зоны?

2 Какие особенности акустического поля пьезопреобразователей в ближней зоне?

3 Какие особенности акустического поля пьезопреобразователей в дальней зоне?

4 Чему равен размер ближней зоны пьезопреобразователей?

5 Чему равен размер дальней зоны пьезопреобразователя?

6 Чем определяется точность построенной диаграммы направленности в данной лабораторной работе?

7 Можно ли с помощью контрольного образца для построения диаграммы направленности наклонного пьезопреобразователя построить диаграмму направленности для прямого преобразователя?

8 Можно ли измерить диаграмму направленности пьезопреобразователя без применения отражателя?

9 Можно ли измерить диаграмму направленности пьезопреобразователя в ближней зоне?

10 В какой системе координат можно строить диаграмму направленности пьезопреобразователя?

## Список литературы

1 **СПиН 2.2.4.13-2-2006.** Лазерное излучение и гигиенические требования при эксплуатации лазерных изделий. – Минск: Минздрав РБ, 2006. – 45 с.

2 **ГОСТ 12.1.009-2019.** ССБТ. Электробезопасность. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 26 с.

3 **Артемьев, Б. В.** Радиационный контроль: учебное пособие для вузов / Б. В. Артемьев, А. А. Буклей ; под ред. В. В. Ключева. – Москва: Спектр, 2011. – 192 с.

4 Лучевая диагностика и лучевая терапия: учебное пособие / А. И. Алешкевич [и др.]. – Минск: Новое знание, 2017. – 382 с.

5 Источники и первичные преобразователи для приборов неразрушающего контроля / В. И. Борисов [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – 320 с.

6 **Бараночников, М. Л.** Приемники и детекторы излучений: справочник / М. Л. Бараночников. – Москва: ДМК Пресс, 2012. – 640 с.

7 Источники и приемники излучений / Г. Г. Ишанин [и др.] – Санкт-Петербург: Политехника, 1991. – 300 с.

8 Ультразвуковой контроль : учебное пособие для вузов / Н. П. Алешин [и др.] ; под ред. В. В. Ключева. – Москва: Спектр, 2011. – 224 с.