



Министерство образования Российской Федерации
Удмуртский государственный университет
Физический факультет
Кафедра биомедфизики

Курганович Владимир Степанович

**СВЧ – СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ
КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ**

Дипломная работа

Научный руководитель:
зав. каф. Биомедфизики,
к.ф.-м.н.
В.Г. Широносков

Ижевск, 2002

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	
1.1. Неравновесные конденсированные среды.....	4
1.2. Методы исследования.....	5
1.3. Ферромагнитный резонанс.....	6
ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ТЕХНИКИ СВЧ	
2.1. Передача и детектирование СВЧ сигнала.....	7
2.2. Полупроводниковые СВЧ приборы.....	25
2.3. Чувствительность спектрометров.....	34
2.4. Методы измерения в линиях передачи.....	36
2.5. Основы ФМР в образцах с анизотропией формы.....	40
ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	
3.1. Стенд по ферромагнитному резонансу.....	43
3.2. СВЧ спектрометр.....	44
3.3. Кривые поглощения при ферромагнитном резонансе.....	52
3.4. Кривые поглощения жидкостей при различных условиях.....	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	56
ЛИТЕРАТУРА.....	57
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	
Методическое руководство к лабораторной работе «Ферромагнитный резонанс в образцах с анизотропией формы». 16 стр.	
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	
Технические характеристики приборов. 12 стр.	
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	
Технические данные стандартных прямоугольных волноводов. 1 стр.	

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на кафедре Биомедфизика физического факультета УдГУ ведётся курс радиофизики, который включает в себя ознакомление с теоретическими основами радиотехники и освоение навыков работы с радио-, высокочастотной и сверхвысокочастотной (СВЧ) аппаратурой. Также на кафедре Биомедфизика проводится серия работ по спектральному анализу неравновесных активированных сред в диапазоне СВЧ. В связи с этим, в рамках курса радиофизики, была поставлена задача: разработать лабораторный СВЧ – спектрометр для проведения лабораторных и исследовательских работ. Это послужило основой для данной дипломной работы.

Дипломный проект включал в себя решение следующих инженерных задач:

1. Разработка стенда и методического пособия для выполнения лабораторной работы «Ферромагнитный резонанс в образцах с анизотропией формы».
2. Создание СВЧ – спектрометра для исследования конденсированных сред (в частности жидкостей) с использованием коаксиальных и волноводных линий в рабочем диапазоне частот от 1,02 до 12,05 ГГц.
3. Автоматизация сбора данных с СВЧ – спектрометра с использованием самопишущих приборов и аналого-цифрового преобразователя ЭВМ.
4. Снятие ряда пробных спектров: спектров ФМР в анизотропных образцах, спектров поглощения жидкостей при различных условиях.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Неравновесные конденсированные среды

К неравновесным конденсированным средам следует отнести среды, подвергнутые физическим воздействиям и переходящие в неравновесные термодинамические состояния без изменения своего химического состава. По истечении некоторого времени (времени релаксации) данные среды возвращаются в исходное состояние. К подобным средам можно отнести вещества в условиях резонанса (магнитного – ЭПР, ЯМР, ФМР; электрического – эффект Штарка, электрохимическая активация жидкостей - ЭХА). При этом возникает необходимость исследования данных явлений физическими методами, среди которых наиболее чувствительными и информативными являются методы спектрального анализа.

На необходимость спектрального анализа исследуемых объектов ещё в конце девятнадцатого века указывал П.Н. Лебедев в своей работе по исследованию пондеромоторного взаимодействия резонаторов – молекул [1]. Взаимодействие резонаторов – молекул по-новому предстаёт в свете современных исследований в области изучения электрохимически активированных (ЭХА) растворов [2] и феномена «бесконтактно активированной жидкости» (БАЖ) [3]. В ряде работ [2, 5] указывалось на то, что вода, обладает внутренней микрокластерной структурой, обусловленной существованием в ней т.н. синхронно осциллирующих диполей (СОД) – устойчивых резонансных системы из осциллирующих «диполей» воды (ионов, молекул, OH^- и т. п.), причём максимум спектральных составляющих, скорее всего, приходится на диапазон СВЧ, т. к. для OH^- характерные частоты вращательных переходов $\nu_0 \sim 2$ ГГц (что отчасти обусловило выбор рабочего диапазона спектрометра). Теоретические предпосылки о возможности существования подобных структур в жидкости были изложены в работах [4 – 7].

Но ввиду чрезвычайной сложности в построении более точной теоретической модели становятся принципиально важными вопросы исследования спектров испускания и поглощения жидких сред, что приводит к необходимости проведения более детальных экспериментов в этой области.

1.2. Методы исследования

По причинам отсутствия единой теоретической модели в настоящее время нет общего мнения насчёт того, в каком диапазоне частот необходимо искать характерные особенности спектральных характеристик, в результате этого спектральный анализ проводится в областях от единиц герц [14] до области инфракрасного излучения [8]. При этом методики исследования сводятся, как правило, к получению серий характеристик для отдельных проб и приведению усреднённых данных [9], причём снятие каждой характеристики происходит в течение от секунд [8] до нескольких минут [14]. В то же время в работах [4, 7] указывается на то, что в жидкостях вероятны процессы с характерными временами порядка 10^{-5} - 10^4 секунд. Также, из предположения о существовании в жидких средах высокочастотных резонаторов [5], способных взаимодействовать друг с другом и с внешними электромагнитными полями [1], необходимо снятие динамики СВЧ спектров в течение длительного времени, порядка нескольких суток и более, чтобы получить данные о возможной зависимости внутренней структуры жидкости от меняющегося со временем внешнего радиационного фона, обусловленного различными факторами: от вспышек на солнце, до работающего неподалёку электрооборудования. Нетепловое воздействие СВЧ поля на активированную жидкость было экспериментально обнаружено в работе [3].

Вышеприведённые требования обусловили необходимость автоматизации СВЧ – спектрометра ЭВМ с использованием АЦП, который позволит фиксировать быстропротекающие процессы и проводить длительные

автоматизированные эксперименты, без необходимости постоянного контроля человеком.

1.3. Ферромагнитный резонанс

Ферромагнитный резонанс – это избирательное поглощение ферромагнетиком энергии электромагнитного поля при частотах (обычно радиодиапазона), совпадающих с частотой собственной прецессии магнитного момента ферромагнетика ([15] с.1423).

Ядерный магнитный (ЯМР), электронный парамагнитный (ЭПР) и ферромагнитный резонансы (ФМР), несмотря на то, что наблюдаются на разных объектах и характеризуются разными частотами, описываются, по сути дела, одной и той же теорией (уравнениями типа Блоха) ([16], с. 4; [17]; [18], с.172).

Основу магниторезонансных методов составляет поглощение энергии электромагнитных волн микроволнового и радиочастотного диапазонов в присутствии внешнего постоянного магнитного поля.

С использованием ФМР возможно определение составных элементов (веществ) исследуемых образцов, изучение структуры и свойств образцов обладающих ферромагнитными свойствами.

Лабораторная работа по ферромагнитному резонансу является частью учебного курса радиофизика. Выполнение данной работы позволит студентам ознакомиться с работой СВЧ аппаратуры, входящей в состав комплекса, узнать о методах исследования ферритов и ферромагнитных материалов, расширить свои познания в области резонансных процессов.

ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ТЕХНИКИ СВЧ

Для создания СВЧ спектрометра необходимо знание основ радиофизики, принципов работы СВЧ приборов и наличие навыков работы с ними, а также представление о процессах, происходящих при распространении СВЧ сигнала в линиях передач и различных средах.

В данной главе кратко описаны основные элементы линий передач в диапазоне сверхвысоких частот, методы измерения в них. Описан ряд методов генерации СВЧ колебаний с применением полупроводниковых приборов.

В конце главы приведена краткая теория ферромагнитного резонанса в образцах с анизотропией формы.

2.1. Передача и детектирование СВЧ сигнала

Электромагнитные волны сверхвысоких частот являются формой электромагнитного излучения, т.е. волнового движения, связанного с электрическими и магнитными силами. Поэтому их общие свойства вытекают из электромагнитной теории. Электромагнитное поле можно рассматривать как область четырех векторов $\vec{E}$, $\vec{H}$, $\vec{D}$ и $\vec{B}$, непрерывных функций времени и положения. В изотропной среде $\vec{D} = \epsilon\epsilon_0\vec{E}$, $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$. Соотношения, определяемые между векторами $\vec{H}$ и $\vec{D}$ законом Ампера, а между векторами $\vec{B}$ и $\vec{E}$ - законом Фарадея, приводят к уравнениям Максвелла:

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}, \quad (1)$$

$$\text{div}\vec{B} = 0, \quad (2)$$

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt}, \quad (3)$$

$$\text{div}\vec{D} = \rho. \quad (4)$$

Так как электромагнитные волны сверхвысоких частот связаны, главным образом, с явлениями, периодическими во времени, удобно ввести изменяющийся во времени комплексный множитель $e^{j\omega t}$, тогда векторы

становятся комплексными величинами, действительные части которых имеют физический смысл. В уравнениях (1) и (3) дифференциальный оператор заменяется мнимой величиной $j\omega$.

Если $\rho=0$, а $\sigma=J/E$, то электрическое поле электромагнитной волны, распространяющейся в направлении оси Z , будет определяться уравнением

$$\frac{d^2 E}{dz^2} - j\omega\mu\mu_0(\sigma + j\omega\varepsilon\varepsilon_0)E = 0. \quad (5)$$

В такой плоско-поляризованной волне типа ТЕМ электрическое поле, магнитное поле и направление распространения взаимно перпендикулярны. Величина электрического поля, удовлетворяющего уравнению (5), равна $Ee^{j\omega t - \gamma z}$, где коэффициент распространения

$$\gamma = \sqrt{(j\omega\mu\mu_0\sigma - \omega^2\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0)} = \alpha + j\beta; \quad (6)$$

где α - коэффициент поглощения; β - волновое число.

В любой данный момент времени картина поля повторяется через расстояние $2\pi/\beta$, которое называется длиной волны; это приводит к фазовой скорости v_p , равной ω/β . Если ε и μ , обладают дисперсией, то группа различных составляющих частот будет распространяться с разными скоростями; это движение характеризуется групповой скоростью $v_g = d\omega/d\beta$, с которой распространяется энергия волны.

Эллиптически поляризованные волны образуются при наложении двух систем плоско-поляризованных волн, распространяющихся в одном направлении и обладающих одинаковой частотой. В общем случае две волны имеют неодинаковые фазы и амплитуды и отличаются своими плоскостями поляризации. Если плоскости поляризации и фазы отличаются на 90° , то электрические поля могут быть разложены на перпендикулярные составляющие $E_x \sin(\omega t - \beta z)$ и $E_y \cos(\omega t - \beta z)$. В любой данной точке пространства при изменении времени, когда одна составляющая равна нулю, другая составляющая максимальна. Вектор, характеризующий электрическое поле, описывает эллипс. В любой данный момент времени вектор, характеризующий полное электрическое поле, описывает в пространстве эллиптическую спираль.

Вектор магнитного поля, связанный с суммой двух элементарных волн, будет повсюду составлять прямой угол с результирующим вектором электрического поля и находиться с ним в фазе. Если обе составляющие волны имеют одинаковые амплитуды, то эллипс становится окружностью, что дает круговую поляризацию. Если $\sigma=0$, то $\alpha=0$ и отсюда

$$\gamma = j\beta = j\omega\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}. \quad (7)$$

В свободном пространстве $\varepsilon=\mu=1$ и скорость распространения $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$; эта величина была определена экспериментально. В любой другой среде фазовая скорость будет

$$v_p = c \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}. \quad (8)$$

Величина, определяемая выражением

$$Z_{wd} = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0}}. \quad (9)$$

называется волновым сопротивлением среды. Пользуясь этим параметром, можно прийти к другому методу рассмотрения электромагнитных волн, основанному на понятии импеданса или полного сопротивления.

Средняя величина полной электромагнитной энергии, запасенной в единице объема, составит

$$U = \frac{1}{4}(\vec{D} \cdot \vec{E}^* + \vec{B} \cdot \vec{H}^*) = \frac{1}{4}\varepsilon\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{4}\mu\mu_0 H^2. \quad (10)$$

Для распространяющейся волны поток энергии через единицу поверхности в единицу времени равен Uv_p . Пользуясь уравнениями (8) и (9), мы приходим к вектору Пойнтинга, определяющему среднюю плотность потока мощности

$$\vec{S}_{cp} = \text{Re}(\vec{S}) = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*). \quad (11)$$

Рассмотрим линии передачи СВЧ колебаний. Как известно, колебания более низких частот обычно передаются по проводным линиям или даже по одиночному проводу (роль второго провода может выполнять шасси, корпус и

т. д., как, например, в низкочастотном радиоприемнике). Передача СВЧ колебаний по линиям имеет ряд особенностей.

На рис. 1. показана двухпроводная линия, начинающаяся приемной двухпроводной антенной (диполем) и уходящая к потребителю СВЧ энергии. Слева на диполь падает T -волна (поперечная СВЧ волна, иначе TEM волна). При этом будут происходить процессы, обратные тем, которые происходят при излучении волны, и в линии в месте подключения диполя появятся СВЧ напряжение и ток, зависящие от напряженностей полей в падающей волне и параметров линии передачи. При этом, естественно, в пространстве между проводниками линии передачи существуют электрическое и магнитное СВЧ поля. Поэтому можно сказать, что падающая электромагнитная волна продолжает свое движение по линии передачи, причем это движение сопровождается протеканием СВЧ тока по проводникам линии.

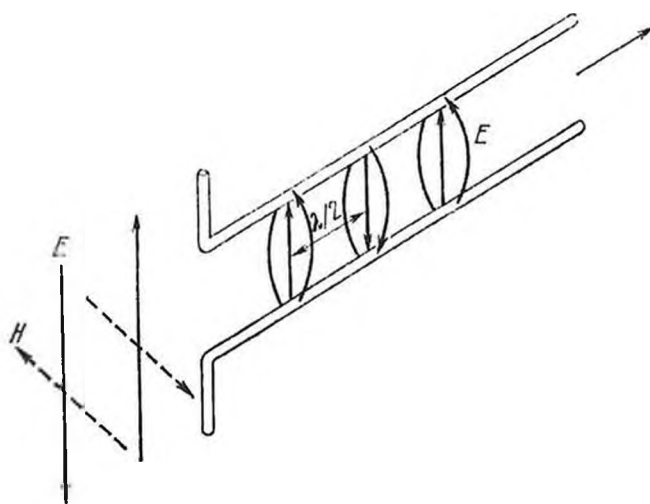


Рис. 1. Распространение T -волны по двухпроводной линии.

Первой особенностью, с которой приходится сталкиваться при передаче СВЧ колебаний по линиям передачи, является непригодность обычной низкочастотной измерительной аппаратуры. Измерение СВЧ напряжений и токов вольтметрами и амперметрами невозможно, так как они имеют большие паразитные емкости и индуктивности, что искажает режим работы линий передач и результаты измерений. Не существует также простых способов измерения напряженностей электрического и магнитного полей СВЧ волны,

распространяющейся по линии передачи. Однако поскольку при рассмотрении волн в свободном пространстве используются понятия полей, то для единообразия часто пользуются теми же понятиями и при рассмотрении линий передач. Так, картина полей в рассматриваемой двухпроводной линии будет иметь вид, представленный на рис. 1. Видно, что линии E и H взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости поперечного сечения двухпроводной линии, т. е. волна в двухпроводной линии, так же как и в свободном пространстве, является Т-волной.

СВЧ электромагнитные волны хорошо поглощаются различными материалами и могут применяться для их нагрева. Это явление можно использовать для достаточно точных количественных измерений на СВЧ. Если знать массу тела, поглощающего СВЧ энергию, и измерить прирост температуры тела, то можно вычислить значение поглощенной энергии. На этом принципе удастся построить достаточно точные измерители СВЧ мощности, передаваемой по линии передачи. Измерение мощности является одним из основных видов измерений на СВЧ. По значению мощности можно при необходимости определить расчетным путем напряженности СВЧ полей или напряжения и токи.

Вторая особенность передачи СВЧ колебаний по линиям состоит в том, что время прохождения СВЧ энергии по линии оказывается сравнимым с периодом колебаний. Так, например, на частоте $f=3000$ МГц (период $T=1/\lambda=3,3\cdot 10^{-10}$ с) СВЧ колебание проходит линию длиной всего 5 см за время около $1,6\cdot 10^{-10}$ с, двигаясь со скоростью света, т. е. время прохождения линии составляет половину периода. На СВЧ нередко используются линии длиной 15—20 см и более. В этом случае время прохождения линии оказывается равным многим периодам колебания. В этом смысле говорят, что все линии передачи на СВЧ являются «длинными» линиями. Передача энергии по таким линиям имеет ряд особенностей.

Важнейшей особенностью является то, что изменения нагрузки, включенной в конце линии, передаются на вход линии с запаздыванием.

Предположим, что генератор СВЧ колебаний включается на линию, в конце которой имеется разрыв. Сначала, пока СВЧ волна не дошла до конца линии, генератор ведет себя так, как будто он работает на нагрузку, поглощающую всю его энергию. Когда волна достигнет разрыва линии, она отразится от него и пойдет назад, к генератору. В линии будут существовать две одинаковые волны, распространяющиеся навстречу друг другу, т. е. будет происходить интерференция (взаимодействие) волн. Пока отраженная волна не достигнет генератора, т. е. в течение многих периодов, он не будет «знать» о разрыве линии. Частичные отражения волн в длинных линиях происходят при резких изгибах или поворотах их проводников, при резких изменениях размеров поперечного сечения проводников и т. д. Без учета интерференции в линиях СВЧ невозможно правильное их конструирование и эксплуатация.

Волновое сопротивление является важным параметром линии передачи и показывает соотношение между напряжением и током в ней. Если на конце линии включается сопротивление, равное волновому, то отражённая волна в конце линии не возникает.

Хотя по двухпроводной линии можно передавать СВЧ колебания, на практике ее применяют очень редко, что объясняется в основном двумя причинами. Во-первых, такая линия сильно излучает в окружающее пространство передаваемые по ней СВЧ колебания, когда ее размеры сравнимы с длиной волны этих колебаний. Излучаемая линией СВЧ энергия может нарушить работу соседних устройств и при большом ее значении становится опасной для работающих. Во-вторых, на СВЧ сильно проявляется так называемый «поверхностный эффект». Он заключается в том, что СВЧ поля не могут проникнуть глубоко в толщу металлических проводников, поэтому токи СВЧ протекают только в поверхностном слое толщиной в единицы микрометров. Из-за этого сильно возрастает сопротивление проводников и увеличиваются потери СВЧ энергии, передаваемой по линии, в результате нагрева проводов. Из всего сказанного следует, что обычная открытая двухпроводная линия малоприспособлена для передачи СВЧ колебаний.

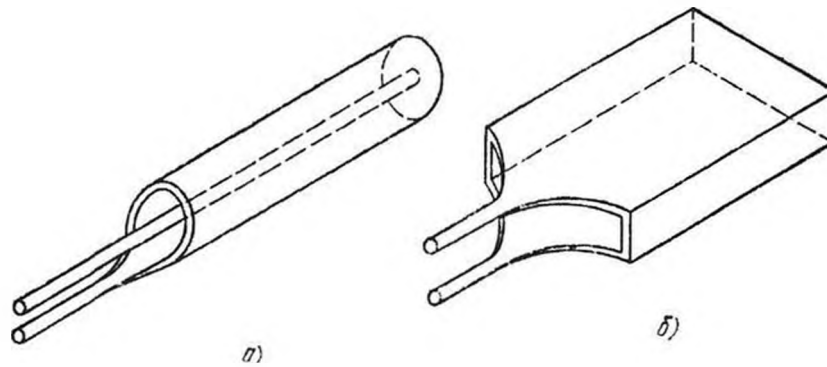


Рис. 2. Переход от двухпроводной линии к коаксиальной (а) и волноводной (б) линиям

На рис. 2. показано, как можно перейти от двухпроводной линии к закрытым, удобным для передачи СВЧ колебаний линиям — *коаксиальной* и *волноводной*. В этих линиях исключаются потери на излучение и существенно уменьшаются потери на нагрев, так как внутренние поверхности, по которым протекают токи СВЧ, значительно увеличиваются. Коаксиальная линия и волновод (разных модификаций) являются основными линиями передачи СВЧ колебаний.

Гибкая коаксиальная линия с диэлектрическим заполнением и внешним проводником в виде плетеного металлического чулка (кабель) часто применяется и на низких частотах. В диапазоне СВЧ потери в диэлектрике и наружной оплетке становятся недопустимо большими, в связи с чем, в ответственных случаях используют коаксиальные линии, в которых внутренний проводник поддерживается тонкими диэлектрическими шайбами, отстоящими на некотором расстоянии друг от друга.

Для уменьшения потерь внутренние поверхности коаксиальных линий СВЧ обычно покрывают слоем серебра толщиной в несколько микрон. Размеры поперечного сечения проводников коаксиальных линий стандартизированы.

Т-волна, распространяющаяся в двухпроводной линии, несколько изменяет свою конфигурацию, попадая в коаксиальную линию. Характер этих изменений легко можно представить, обратившись к рис. 2, а. Поэтому на рис. 3,а. дана

мгновенная картина полей в коаксиальной линии. В сечениях *a* и *в* напряженности электрического и магнитного полей максимальны. Чтобы показать это, на рисунке в этих сечениях силовые линии проведены густо. По мере приближения к сечению *б* напряженности полей уменьшаются до нуля, поэтому силовые линии в этой области совсем не проведены. Если договориться отображать значения напряженностей полей длиной стрелок, а не густотой их, то можно мгновенную картину *T*-волны в коаксиальной линии (рис. 3,б.) изобразить так же, как для волны, распространяющейся в свободном пространстве.

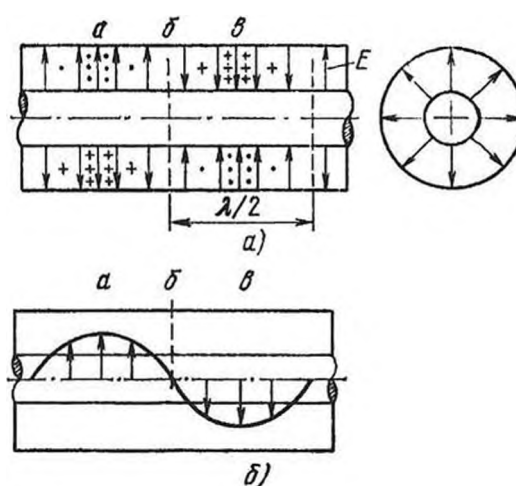


Рис. 3. Картина полей (а) и распределение электрического поля (б) в коаксиальной линии.

Скорость движения энергии по коаксиальной линии (v_p) равна скорости света c в вакууме, если линия не заполнена диэлектриком, и уменьшается в $\sqrt{\epsilon}$ раз при таком заполнении (ϵ - диэлектрическая проницаемость). Фазовая скорость волны в коаксиальной линии также равна c . При этом обе скорости остаются постоянными для любой частоты.

СВЧ поля как в линиях передачи, так и в других устройствах СВЧ достаточно просто исследовать экспериментально. Дело в том, что размеры антенн, на которые воздействуют СВЧ поля, могут быть достаточно малыми. Такие антенны работают удовлетворительно даже тогда, когда их размеры уменьшены настолько, что они помещаются внутри линий передач или других устройств СВЧ. На рис. 4. показаны два типа антенн СВЧ: диполь с одним

проводником (роль второго выполняет стенка линии передачи) и магнитная рамка внутри коаксиальной линии. Часто такие антенны называют соответственно электрическим и магнитным зондами, поскольку диполь реагирует только на электрическое поле СВЧ волны, а рамка — на магнитное. Вводя зонды в различные точки по длине линии, можно узнавать о наличии и относительном значении напряженностей полей в этих точках. Выходы зондов обычно присоединяют через кристаллические детекторы к микровольтметру или микроамперметру, по показаниям которых и судят об относительных значениях напряженности полей.

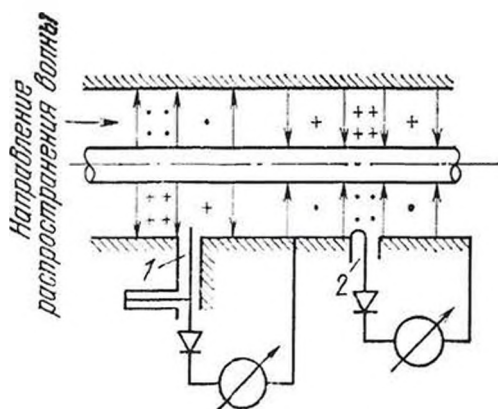


Рис. 4. Электрический (1) и магнитный (2) зонды в коаксиальной линии.

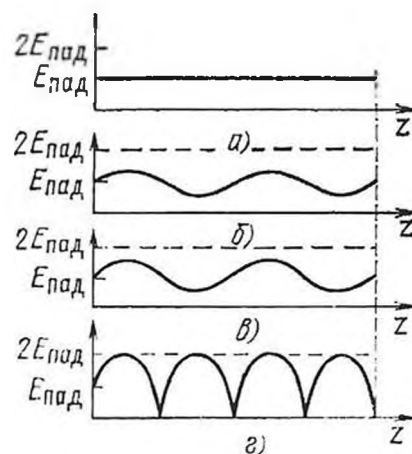


Рис. 5. Распределение электрического поля волны в линии: а — режим полного согласования; б, в — режимы частичного согласования; г — режим полного рассогласования

СВЧ волна, мгновенная картина полей которой дана на рис. 4, движется по линии слева направо. Можно сказать, что слева линия уходит к генератору СВЧ энергии, а справа — к ее потребителю. Потребителями СВЧ энергии в общем случае называются *СВЧ нагрузкой* передающей линии.

Если нагрузка линии передачи может потребить всю падающую СВЧ энергию, то она называется *согласованной* с данной линией, а режим работы линии называется *режимом согласования*. Если располагать вдоль такой линии электрический зонд в разных точках, то можно убедиться в том, что бегущая по

линии волна будет наводить одни и те же напряжения в зонде независимо от его местоположения. Таким образом, в режиме согласования амплитуды переменных СВЧ полей (им пропорциональны показания зонда с детектором) вдоль линии постоянны. Графически этот режим работы отображается так, как это показано на рис. 5, а.

Если нагрузка на конце линии не может поглотить всю падающую на нее СВЧ энергию, то в линии появляется отраженная волна, направляющаяся от нагрузки к генератору. Такой режим работы называется *рассогласованным*. Вид волны при полном или частичном рассогласовании представлен на рис. 5, б, в, г. Иначе изображение на рис. 5, г. называется картиной *стоячей волны*, а на рис. 5, а. — картиной *бегущей волны*.

В начале главы было введено понятие характеристического сопротивления для СВЧ волны. В коаксиальной линии поля E и H тесно связаны с СВЧ напряжениями и токами, и более удобной характеристикой их взаимной связи в линии является уже упоминавшееся волновое сопротивление

$$Z_0 = \frac{U}{I}, \quad (12)$$

где U — напряжение между проводниками линии; I — ток, текущий в проводниках. Для коаксиальной линии Z_0 определяется по следующей формуле:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\varepsilon_0 \varepsilon}} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{R_{\text{нар}}}{R_{\text{вн}}}. \quad (13)$$

где μ_0 и μ — абсолютная и относительная магнитные проницаемости пространства между проводниками линий; ε_0 и ε — абсолютная и относительная диэлектрические проницаемости того же пространства; $R_{\text{вн}}$ — внутренний радиус наружной трубы; $R_{\text{нар}}$ — наружный радиус внутренней трубы.

При заполнении линии диэлектрическими материалами с $\varepsilon > 1$ сопротивление Z_0 уменьшается в $1/\sqrt{\varepsilon}$ раз. Оптимальный расчёт коаксиальных линий для сверхвысоких частот был проведён инженерами организации IEE [10]: наилучшая компромиссная величина волнового сопротивления для

термопластических кабелей общего применения оказалась равной 50 Ом, а для кабелей с малыми потерями с воздушным заполнением – 75 Ом.

Рассмотренная выше коаксиальная линия может применяться для передачи колебаний почти на любых частотах. В виде хорошо известного кабеля она применяется как силовая линия передачи на промышленной частоте (50 Гц). По кабелю можно также передавать и постоянный ток.

Далее мы рассмотрим линию передачи, специфичную только для СВЧ диапазона. Эта линия передачи называется волноводной или, коротко, волноводом. На рис. 2,б. показано, как двухпроводная линия может быть превращена в прямоугольный волновод. На первый взгляд кажется, что по такой

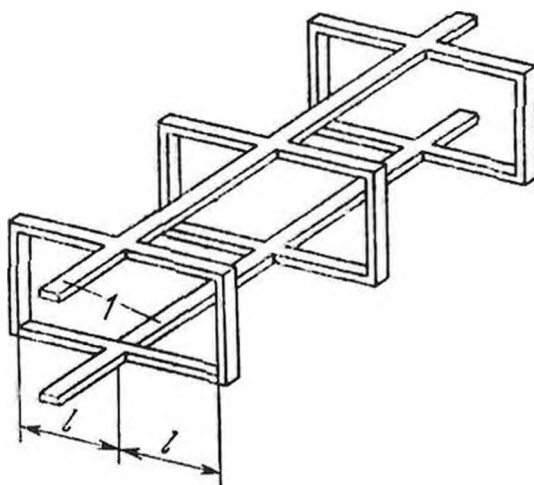


Рис. 6. Переход от двухпроводной линии к волноводу.

линии электрические колебания передаваться не могут: металлические боковые стенки должны закоротить верхнюю и нижнюю пластины. Действительно, ни на постоянном токе, ни в радиодиапазоне волновод не применяется. По-иному складывается ситуация при переходе в СВЧ диапазон.

На рис. 6. показан другой пример перехода двухпроводной линии в волновод: к основной двухпроводной линии из ленточных или круглых проводников 1 слева и справа примыкает множество отрезков линий длиной l , закороченных на конце. Известно [11, стр. 25-26], что на длине волны λ_0 , для

которой $l=\lambda_0/4$, входное сопротивление закороченной линии $Z_{\text{вх}}=\infty$, т. е. присоединение отрезков длиной $\lambda_0/4$ к линии не влияет на распространение в ней СВЧ волны с длиной λ_0 . При большом числе присоединенных отрезков получим сплошную металлическую трубу (волновод). Значит, СВЧ колебания (по крайней мере с длиной волны λ_0) могут беспрепятственно распространяться в волноводе с широкой стороной $2l$. Так же доказано [10, стр. 46-52; 11, стр. 29-30], что волновод сможет пропускать СВЧ колебания с длиной волны, меньшей λ_0 .

Длина волны λ_0 играет роль некоторой граничной длины волны, разделяющей все возможные колебания на распространяющиеся и не распространяющиеся по волноводу. Эта граничная длина волны и соответствующая ей частота называются *критическими*. Если обозначить размер широкой стенки волновода буквой a , то

$$\lambda_{\text{кр}} = 2a, \quad (14)$$

$$f_{\text{кр}} = \frac{c}{\lambda_{\text{кр}}} = \frac{c}{2a}. \quad (15)$$

Этим объясняется, почему волновод не применяется не только в радиодиапазоне, но даже и в начале СВЧ диапазона ($\lambda=1\text{ м}$, $f=0.3\text{ ГГц}$). Так, для пропускания СВЧ колебаний с длиной волны 1 м необходим волновод с размером широкой стенки не менее чем 50 см, как это следует из формулы (14). Такие волноводы слишком громоздки и тяжелы. Поэтому в начале СВЧ диапазона (до длин волн 10-15 см) почти всегда применяется коаксиальная линия передачи. На более коротких волнах используются как коаксиальные линии, так и волноводы, а при очень коротких длинах волн (от единиц сантиметров до миллиметров) только волноводная линия передачи. Коаксиальная линия имеет в этом диапазоне слишком большие потери на нагрев проводников из-за поверхностного эффекта.

Волновод по конструкции проще коаксиальной линии. Кроме того, потери СВЧ энергии в его стенках в общем случае меньше, чем потери в коаксиальной линии. Все это обусловило широкое использование волноводов в СВЧ технике.

Однако электромагнитная теория волновода является более сложной, чем теория коаксиальной линии.

Картина полей E и H в волноводе является более сложной, чем при движении волны в свободном пространстве или в коаксиальной линии. Строгое решение уравнений Максвелла для прямоугольного волновода показывает, что T -волна в нем существовать не может. В общем случае возможны два класса видов волн: поперечные электрические волны – TE и поперечные магнитные волны – TM [10, стр. 47-49]. Волны TE известны также под названием волн H , потому что они имеют составляющую магнитного поля в направлении распространения. По аналогичной причине волны TM называются также волнами E .

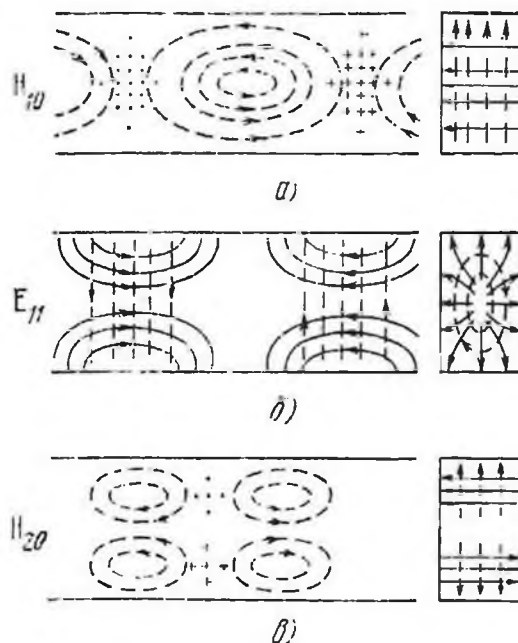


Рис. 7. Основной (а) и высшие (б, в) типы волн в прямоугольном волноводе: ——— линии электрического поля; — — — линии магнитного поля.

На рис. 7. приведены для примера картины полей основного и двух высших типов колебаний в прямоугольном волноводе. *Высшим типом колебаний* называют колебания с длиной волны $\lambda \leq a$ для данного волновода, колебания с длиной волны вблизи $\lambda \approx 2a$ относятся к *основному типу колебаний* (большинство экспериментов проводится с использованием основного вида

колебаний). Обозначают типы колебаний двумя индексами n и m , добавляемыми к буквам TE_{mn} (H_{nm}) или TM_{mn} (E_{nm}). Первый индекс указывает на число полуволн картины поля в поперечном сечении волновода вдоль широкой стенки, второй — число полуволн вдоль узкой стенки [10, стр. 47].

Так, TE_{01} (иначе H_{10}) обозначает колебание поперечно-электрическое, вдоль широкой стенки поле E изменяется и имеет одну полуволну (индекс $m=1$), вдоль узкой стенки поле не изменяется (индекс $n=0$). Распространение в прямоугольном волноводе колебаний только одного вида TE_{01} обеспечивается при отношении ширины волновода к длине волны, лежащем в пределах от 0.5 до 1.0, и при отношении высоты волновода к длине волны, меньшем 0.5, но оптимальные размеры зависят от многих факторов [10].

Волноводы общего применения служат для передачи колебаний вида TE_{01} . Для перекрытия спектра сверхвысоких частот были согласованы международные стандарты. Размеры и отношение сторон волновода основаны на различных технических факторах. Средняя рабочая, или номинальная, частота принята в 1,5 раза больше предельной частоты λ_c , и допустимые отклонения составляют самое большее $\pm 20\%$ от этой средней частоты. За двумя или тремя исключениями, отношение сторон волноводов общего применения равно 2, это позволяет переходить от одного волновода к другому, для чего достаточно провести прямую линию под соответствующим углом к оси. Этим волноводам присвоены типовые номера, которые вместе с техническими данными приведены в приложении 3; величина λ/λ_c изменяется в диапазоне 0.53—0.80, а λ_g/λ — в диапазоне 1.18—1.67, где λ_g длина волны данного колебания в волноводе, которая отличается от длины волны в свободном пространстве [10, стр. 46-49; 11, стр. 31-32]:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}}. \quad (16)$$

Выбор частотного типа линии передачи определяется следующими факторами: перекрытием по частоте, затуханием и допустимой мощностью.

Сравнительные характеристики коаксиального и волноводного типа линий приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметр \ Линия	Коаксиальные линии	Волноводные линии
1. Конструкция	Сложная	Простая
2. Затухание	Большое, при заполнении диэлектриком	Малое
3. Допустимая мощность	Низкая	Высокая
4. Диапазон частот	Практически от нуля и до частоты, ограничивающей распространение волн высших видов	Для перекрытия широкого диапазона необходимо несколько волноводов различного сечения [приложение 3]

При переходе с одного вида линии передачи на другой или с одного вида колебаний на следующий необходим преобразователь вида колебаний. В случае правильной конструкции все возникающие высшие виды колебаний быстро затухают, а входная линия передачи при этом оказывается нагруженной на комбинацию активной и реактивной проводимостей, т.е. вносимое в линию рассогласование минимально. Полоса пропускания преобразователя видов колебаний зависит в основном от того, насколько быстро активная проводимость отклоняется с изменением частоты от величины согласованной нагрузки; наибольшая полоса достигается при условии, что производная активной проводимости по частоте равна нулю.

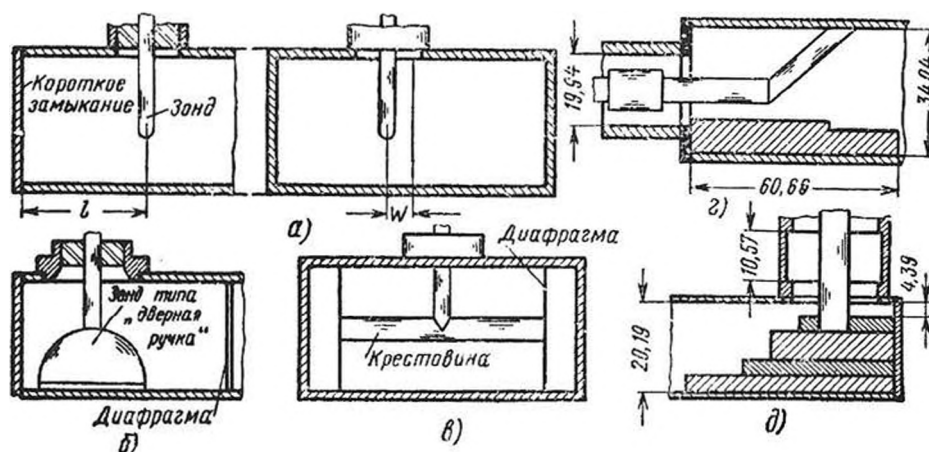


Рис. 8. Широкополосные коаксиально-волноводные переходы. На рисунках показаны следующие типы: а – переход зондовый; б – переход типа «дверной ручки»; в – крестовинный переход; г – соосный; д – перпендикулярный.

между волнами Π_1 и Π_2 не будет сдвига во времени, они сложатся, и в плечо C пойдет суммарная ответвленная СВЧ волна. Ее значение будет зависеть от диаметра отверстий.

Волны, обозначенные через O_1 и O_2 , идут в обратном направлении. Основная волна, дойдя до первого отверстия и создав частичную волну O_1 , пойдет дальше ко второму отверстию, а волна O_1 уйдет в плечо D . Пока основная волна дойдет до второго отверстия, создаст вторую обратную волну O_2 и пока эта вторая волна дойдет по второму волноводу до первого отверстия, фронт волны O_1 успеет уйти в плечо D на расстояние равное расстоянию между отверстиями. Между волнами O_1 и O_2 появится, следовательно, сдвиг во времени, который будет зависеть от расстояния между отверстиями. Если выбрать это расстояние равным $\lambda_g/4$ (где λ_g —длина волны в волноводе), то сдвиг между волнами O_1 и O_2 по времени будет равен $T/2$ (половине периода). Складываясь, такие волны гасят друг друга. Таким образом, в направленном ответвителе в плечо B идет чуть ослабленная основная волна, а в плечо C —ответвленная волна. В плечо D волна проходит только в течение очень короткого времени, равного половине периода колебаний, в момент включения основной волны. После этого времени волна в плече D компенсируется и исчезает. Именно потому, что рассмотренный ответвитель реагирует только на волну одного направления, он и называется направленным.

Очевидно, что расстояние между отверстиями в ответвителе может быть равным $\lambda_g/4$ лишь для одной длины волны. Для волн других длин сдвиг во времени не будет в точности равен $T/2$ и полной компенсации в плече D не произойдет.

Для того чтобы сохранить хорошую направленность в широком диапазоне длин волн, в ответвителях делают не два, а много отверстий, подбирая расстояния между ними [10, стр. 161-165]. В плечо D ответвителя ставится согласованная нагрузка, которая поглощает остаточную нескомпенсированную часть обратной волны.

Отношение $A=P_{\text{пад}}/P_{\text{отв}}$ называют *переходным ослаблением* ответвителя. Обычно его выражают в децибелах:

$$A[\text{дБ}] = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{пад}}}{P_{\text{отв}}} \right). \quad (17)$$

Отношение $P_{\text{пад}}/P_{\text{ост}}$ называется *направленностью* ответвителя и характеризует величину остаточной нескомпенсированной волны. Направленность также выражается в децибелах. Ответвители изготавливают с ослаблением в 10, 20, 30, 40 дБ или на промежуточные значения. Направленность хороших ответвителей составляет 20—30 дБ.

В коаксиальных линиях и на нижней границе диапазона сверхвысоких частот применяют направленный ответвитель с собственной направленностью, известный под названием рефлектометра. Устройство состоит из петли, один конец которой через сопротивление соединен с внешней стенкой линии передачи, а другой конец — с внутренним проводником вспомогательной коаксиальной линии. Размеры петли гораздо меньше длины волны, поэтому она обеспечивает лишь слабую связь с поперечными электрическим и магнитным полями волны, распространяющейся в главной линии передачи. При соответствующем выборе параметров связи, СВЧ сигнал в выходной линии будет существовать только для волны одного из направлений основной линии, что и характеризует направленность [10, стр. 159-160].

В СВЧ диапазоне широко используются индикаторы СВЧ, называемые *детекторными секциями* (рис. 10.). Кристаллический диод 3 действует как выпрямитель СВЧ токов, роль емкости фильтра выполняет вкладыш 1, изолированный от корпуса 2 волновода тонкой слюдяной шайбой. Расстояние l подбирается экспериментально для получения хорошего согласования детекторной секции с волноводом, к которому она подсоединяется. От разъема 4 выпрямленное напряжение подается кабелем к микровольтметру или микроамперметру.

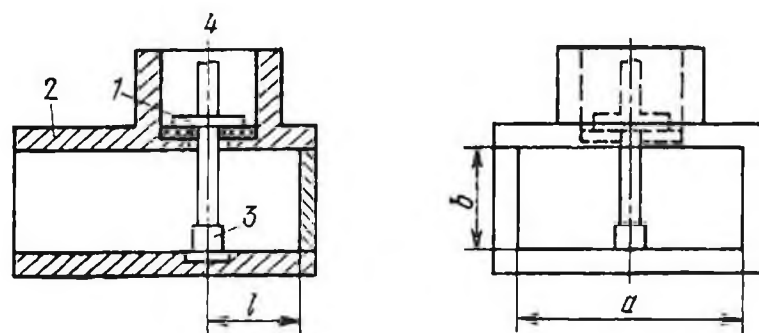


Рис. 10. Детекторная секция в прямоугольном волноводе. 1 – вкладыш, 2 – корпус волновода, 3 – кристаллический диод, 4 – разъём.

Детекторные секции присоединяются к основной линии передачи с помощью направленного ответвителя и служат очень чувствительными индикаторами СВЧ мощности.

2.2. Полупроводниковые СВЧ приборы

В электровакуумных СВЧ приборах достигнуты весьма высокие значения выходной мощности, коэффициента усиления, КПД и других параметров, что длительное время обуславливало их практически монопольное положение при создании генераторов и усилителей для различных областей СВЧ диапазона. В то же время стремление к миниатюризации приборов, повышению их надежности, долговечности и экономичности стало причиной того, что на СВЧ, как и на более низких частотах, интенсивно развивалось и другое направление – создание полупроводниковых приборов СВЧ, в которых физические процессы происходят не в вакууме, а в кристаллической решетке твердого тела.

В полупроводниковых материалах концентрация свободных носителей заряда в десятки, сотни и тысячи раз меньше, чем концентрация электронов в металле. Поэтому СВЧ поля способны проникать в эти материалы в отличие от металлов на значительную глубину, что создаст условия для объемного взаимодействия их с электронами. Кроме того, известно, что контакт разнородных полупроводниковых материалов обладает односторонней

проводимостью. Два последних обстоятельства являются физическими предпосылками создания полупроводниковых СВЧ приборов.

К настоящему времени созданы и широко применяются несколько типов полупроводниковых генераторных и усилительных приборов — СВЧ транзисторов и диодов. Некоторые наиболее характерные примеры рассмотрены далее.

Размеры кристаллов СВЧ полупроводниковых приборов невелики (порядка 1 мм и менее), что связано с необходимостью уменьшения времени пролета носителей зарядов, существенно определяющего рабочие частоты этих приборов. При таких размерах не удастся получить значительной выходной мощности от одного прибора. Для ее увеличения используют схемы сложения мощностей нескольких приборов.

Низкие питающие напряжения, высокая надежность, большой срок службы и возможность миниатюризации позволяют во многих случаях осуществить замену электровакуумных приборов полупроводниковыми в СВЧ аппаратуре малой и средней мощности.

В области малых и средних мощностей для усиления СВЧ сигналов все более широкое применение находят транзисторы. В основе работы СВЧ транзисторов лежат физические процессы, характерные для транзисторов вообще. Низкочастотные и СВЧ транзисторы отличаются размерами рабочих областей кристалла и паразитными реактивностями транзисторной структуры и корпуса — они должны быть существенно меньше. СВЧ транзисторы, как и низкочастотные, можно разделить на два основных класса — биполярные и полевые. В совершенствовании конструкций и улучшении параметров обоих классов СВЧ транзисторов исключительно важную роль играет технология.

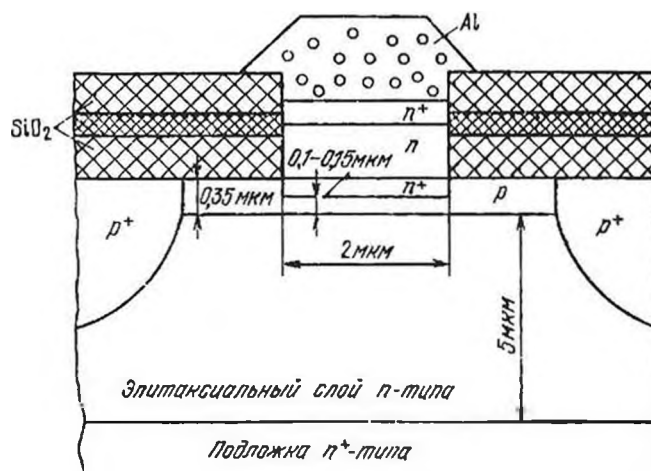


Рис. 11. Структура биполярного СВЧ транзистора.

Высокая точность воспроизведения субмикронных размеров эмиттерных и базовых полосок в СВЧ транзисторах обеспечивается применением электронной литографии. На рис. 11. приведена структура и геометрические размеры кремниевого биполярного транзистора с выходной мощностью 10 Вт на частоте около 1 ГГц с характерными субмикронными размерами областей.

Основное применение этих приборов — усилители в системах радиолокации, спутниковой связи, радиорелейных линий.

В настоящее время мощные СВЧ транзисторы широко применяются в системах релейной связи, подвижных средствах наземной связи, в радиолокаторах с фазированными антенными решетками, авиационном радиооборудовании и т. п.

Диод Ганна — полупроводниковый прибор без $p-n$ перехода, обладающий динамическим отрицательным сопротивлением, появляющимся благодаря объемному эффекту (эффекту Ганна) в образце однородного полупроводника. Наличие отрицательного сопротивления обуславливает способность диодов Ганна, подключенных к объемным резонаторам, генерировать гармонические колебания СВЧ [11, стр. 171-177].

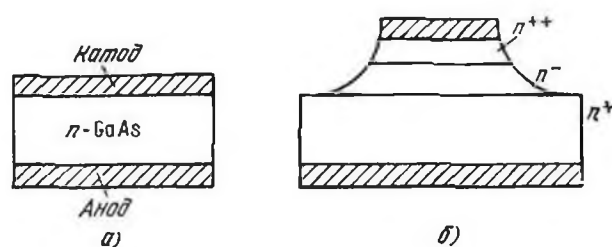


Рис. 12. Структуры диодов Ганна: в — монокристаллический диод; б — мезодиод на основе эпитаксиальной пленки.

Рассмотрим физические основы работы диода Ганна. Объемный эффект в диоде Ганна обусловлен не какими-то специальными конструктивными решениями, а физическими свойствами исходного полупроводника, имеющего, как указывалось, две подзоны (долины) в зоне проводимости с различной подвижностью носителей заряда в них. Эта особенность позволяет при определенной напряженности электрического поля получать отрицательную динамическую (дифференциальную) подвижность носителей заряда, а следовательно, и отрицательную проводимость и отрицательное сопротивление диода, т.е. обеспечивать условие генерации колебаний.

На рис. 13. приведена структура энергетических зон и зависимость дрейфовой скорости носителей заряда $v_{др}$ от напряженности электрического поля E для арсенида галлия. Энергетический зазор между верхним уровнем нижней подзоны и нижним уровнем верхней подзоны для GaAs составляет $\Delta W = 0,36$ эВ. Подвижность носителей в верхней подзоне для GaAs примерно в 50 раз меньше, чем в нижней. При комнатной температуре и в отсутствие внешнего электрического поля электроны находятся в нижней подзоне. Если приложить к образцу GaAs небольшую разность потенциалов, в образце возникает электрическое поле (участок 1—2 на рис. 13, б), ускоряющее электроны.

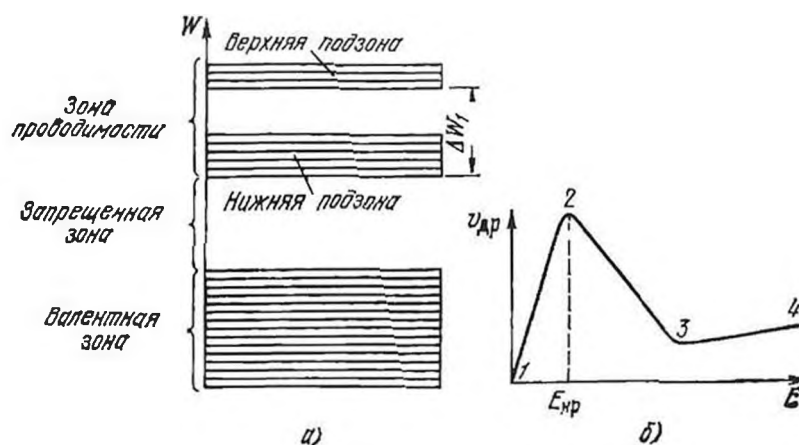


Рис. 13. Энергетические зоны GaAs (а) и зависимость дрейфовой скорости от напряженности электрического поля (б).

При увеличении E кинетическая энергия электронов возрастает, и если напряженность электрического поля достигает критического значения $E_{кр}$, то электроны приобретают энергию и переходят в верхнюю подзону. Этот переход приведет вследствие уменьшения подвижности к уменьшению дрейфовой скорости и проводимости.

Таким образом, участок 2—3 на рис.13, б. соответствует отрицательной проводимости. При дальнейшем увеличении напряженности поля дрейфовая скорость растет незначительно (участок 3—4), оставаясь равной примерно 10^7 см/с. Достигается насыщение дрейфовой скорости.

Исследования показали, что критическая напряженность поля достигается не во всем объеме образца, а лишь в некоторой узкой области, в которой и происходят переходы электронов из нижней подзоны в верхнюю. Эту область называют *областью объемной электрической неустойчивости*. Именно ей присуща отрицательная проводимость. Объемная электрическая неустойчивость в образце полупроводника лежит в основе эффекта Ганна — возникновения колебаний тока в СВЧ диапазоне. Будучи включенным в СВЧ резонатор (рис. 15.), диод Ганна возбуждает в нем электромагнитные колебания.

Рассмотрим физическую картину возникновения колебаний тока в диоде Ганна. Приложим между анодом и катодом разность потенциалов 5 – 25 В (в

зависимости от длины кристалла). В полупроводниковом материале практически всегда имеются участки с неравномерным распределением концентрации примесей, поэтому предположим, что вблизи катода имеется узкая область с пониженной концентрацией донорной примеси. Сопротивление этой области будет выше, чем в остальной части образца, что обусловит повышенную напряженность электрического поля в этой узкой области.

Если напряженность поля превышает критическую $E_{кр}$, то, как мы видели выше, начнется междолинный переход электронов из нижней подзоны в верхнюю. Дрейфовая скорость электронов, находящихся в верхней подзоне, уменьшится, и они будут отставать от электронов, находящихся еще в нижней подзоне. В результате в рассматриваемой узкой области образуется двойной электрический слой зарядов, называемый *электрическим доменом* (рис. 14.). Действительно, в левой части скапливаются медленные электроны, в правой же — положительные ионы примеси, не скомпенсированные ушедшими быстрыми электронами.

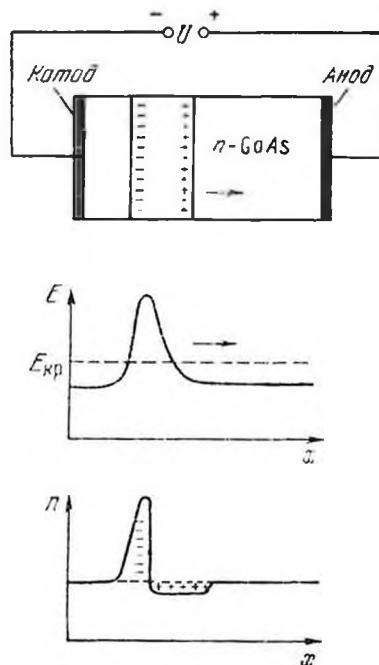


Рис. 14. Распределение поля и концентрации носителей зарядов по образцу.

Возникновение двойного электрического слоя увеличивает разность потенциалов и напряженность поля области домена, а это способствует

переходу новых электронов в верхнюю подзону, т. е. увеличению заряда домена и напряженности электрического поля в нем. Происходит лавинообразное нарастание заряда домена и напряженности электрического поля в нем, а это (как видно из рис. 13,б, участок 3 – 4) приводит к росту скорости электронов в домене, т.е. скорости перемещения самого домена. Так как напряжение на образце остается постоянным, то возрастание разности потенциалов в области домена означает уменьшение разности потенциалов и напряженности электрического поля во всей остальной области. Это, в свою очередь (как видно из рис. 13,б, участок 1 – 2), приводит к уменьшению скорости электронов вне домена. Через некоторое время скорости выравниваются, и наступает динамическое равновесие между движением зарядов в домене и вне его. Формирование домена заканчивается, и он продолжает движение к аноду. Подойдя к нему, домен исчезает, но в это время у катода зарождается новый домен и физический процесс повторяется. При формировании домена ток в образце уменьшается, при исчезновении возрастает, т. е. возникают пульсации тока.

Рассмотренный режим работы диода Ганна называют *пролетным*. Для него характерно, что СВЧ резонатор, подключенный к диоду, имеет низкую добротность и амплитуда СВЧ напряжения мала по сравнению с постоянным напряжением, приложенным к кристаллу. В таком режиме СВЧ напряжение практически не влияет на процессы формирования и движения домена. Частота генерируемых колебаний в пролетном режиме определяется длиной образца и дрейфовой скоростью. КПД в пролетном режиме обычно не превышает нескольких процентов.

В зависимости от того, какие значения частоты колебаний, мощности и КПД необходимо получить, диоды Ганна эксплуатируют и в других режимах. Один из них — *режим с задержкой образования домена*. Диод подключается к высокودобротному СВЧ резонатору, так что амплитуда высокочастотного напряжения велика по сравнению со значением постоянного напряжения. В таком режиме образование и движение домена определяется СВЧ напряжением.

При этом период СВЧ колебаний больше времени пролета домена и определяется частотой настройки резонатора. Указанный режим отличается повышенным по сравнению с пролетным режимом значением КПД.

Рассмотренные режимы применимы для частот порядка нескольких единиц гигагерц. На частотах свыше 10 ГГц диоды Ганна эксплуатируют в так называемом *режиме ограниченного накопления объемного заряда (ОНОЗ)*. Диод помещают в высокودобротный СВЧ резонатор. При этом в полупериод СВЧ колебаний, когда сумма постоянного и переменного напряжения обеспечивает максимальную напряженность электрического поля, создаются условия для формирования электрического домена. Благодаря высокой добротности резонатора уже в начале следующего полупериода происходит эффективная отдача энергии СВЧ полю, и в резонаторе наводится такое высокочастотное напряжение, что суммарное напряжение между анодом и катодом приводит к ограничению дальнейшего нарастания объемного заряда и гашению домена еще до того, как он достигнет анода.

Начало формирования нового домена наступит тогда, когда сумма высокочастотного напряжения и напряжения источника вновь обеспечит критическую напряженность поля в образце. Это эквивалентно уменьшению длины L , т. е. может быть достигнута более высокая частота генерируемых колебаний. Эта частота в режиме ОНОЗ определяется, таким образом, частотой резонатора. В режиме ОНОЗ достигнута рабочая частота 160 ГГц.

Существуют и другие, в том числе гибридные, режимы эксплуатации диодов Ганна.

Сравнительно высокая выходная мощность, хорошая спектральная чистота сигнала, низкий уровень шумов, высокая надежность позволяют диодам Ганна конкурировать с транзисторами, туннельными диодами и клистродами малой мощности.

Диоды Ганна широко применяются в различных переносных радиолокаторах, высотомерах, радиомаяках, системах связи, а также в качестве логических элементов и в других устройствах.

Как в транзисторных, так и в диодных генераторах в качестве перестраиваемого высокочастотного контура генератора используется сфера из монокристалла феррита с одним или двумя витками связи, помещенными в поле электромагнита.

Перестройка частоты генераторов в широком диапазоне частот осуществляется изменением величин магнитных полей, создаваемых электромагнитами при изменении величин тока, протекающего в их катушках.

Зависимость между величиной магнитного поля, а следовательно и между величиной тока, протекающего по катушке электромагнита, и частотой генерации прямопропорциональная.

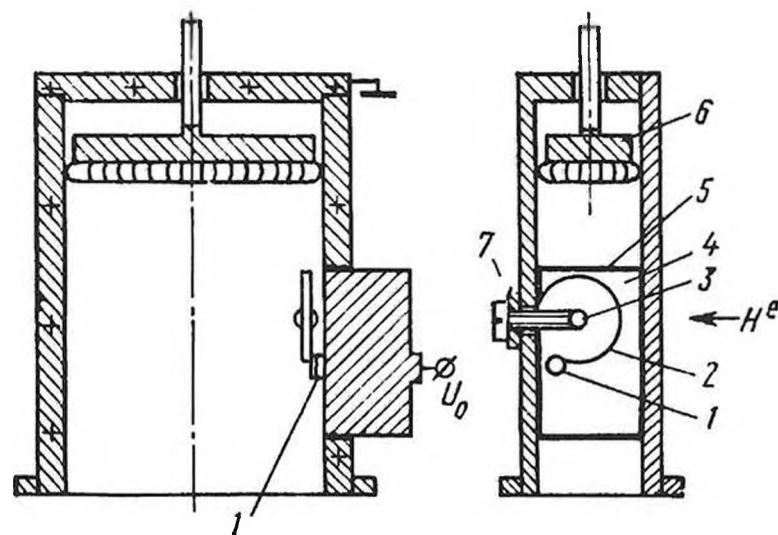


Рис. 15. Волноводный генератор на диоде Ганна, перестраиваемый ферритом. 1 — бескорпусный диод Ганна, 2 — петля связи, 3 — сфера монокристалла феррита, 4 — радиатор, 5 — изолятор, 6 — поршень, 7 — подстроечный винт, H^e — внешнее магнитное поле, U_0 — питающее напряжение.

Волноводный генератор на диоде Ганна (ГДГ), перестраиваемый гиромангнитным резонатором (ГР), схематически показан на рис. 15. Бескорпусный диод Ганна 1 припаян к медному радиатору 4, поверхность которого совпадает с плоскостью узкой стенки волновода. Радиатор изолирован по постоянному току от волновода диэлектрической прокладкой 5. Диод Ганна соединен с витком связи 2, плоскость которого параллельна узкой стенке

волновода. Второй конец витка 2 закорочен на широкую стенку волновода. В центре витка расположена сфера 3 из железо-иттриевого граната (ЖИГ), укрепленная на торце винта 7, с помощью которого подбирают ее оптимальное положение. Управляющее магнитное поле H^e перпендикулярно широкой стенке волновода. Диод Ганна и виток вместе со сферой образуют замкнутый через блокировочную емкость 5 последовательный контур. При подаче на диод напряжения питания в этом контуре возникают колебания, частота которых практически совпадает с частотой ферромагнитного резонанса (ФМР) сферы. Прецессирующий магнитный момент сферы ЖИГ возбуждает в волноводe волны, интенсивность которых (а, следовательно, и мощность на выходе генератора) зависит от положения поршня 6. Перемещением поршня добиваются равномерной мощности по диапазону перестройки. Так как виток параллелен узкой стенке волновода, взаимодействия тока витка с полем волны основного типа TE_{01} (H_{10}), волновода нет, благодаря чему возбуждение волновода осуществляется только прецессирующим магнитным моментом гиромангнитного (ферритового) резонатора, и частота генерации не зависит от положения поршня 6.

2.3. Чувствительность спектрометров

Наблюдение и измерение линий поглощения в сантиметровом диапазоне производятся с помощью специальных приборов — спектрометров. Выбор варианта их конструкции зависит от таких факторов, как рабочая частота, свойства исследуемого вещества и характер требуемой информации. Основные элементы спектрометров следующие: поглощающая ячейка, перестраиваемый генератор сантиметрового диапазона, частотный модулятор для линий поглощения или генератора сигналов, детектор сантиметрового диапазона, усилитель продетектированного сигнала, индикатор сигнала.

Факторы, определяющие предел, при котором еще возможно детектирование и измерение слабых линий поглощения, могут быть выражены

коэффициентом прохождения мощности через согласованную волноводную поглощающую ячейку. При мощности на входе $P_{\text{вх}}$ мощность на выходе ячейки

$$P = P_{\text{вх}} e^{-\alpha_c l}, \quad (18)$$

где α_c – коэффициент поглощения ячейки; l – длина ячейки.

А при наличии поглощения в исследуемой среде

$$P + \Delta P = P_{\text{вх}} e^{-(\alpha_c + \alpha_g)l}, \quad (19)$$

где α_g – коэффициент поглощения в среде.

В случае волноводной ячейки эффективная длина l равна истинной длине, деленной на $\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}$ [см. гл. 2.1.]. Изменение мощности на выходе, обусловленное поглощением, при условии $\alpha_g l \ll 1$ равно:

$$\Delta P = \alpha_g l P_{\text{вх}} e^{-\alpha_c l}. \quad (20)$$

Ячейка может иметь вид объемного резонатора, в котором происходит эффективное увеличение пути распространения волны.

Изменение мощности ΔP , определяемое выражением (20), является как раз той величиной, которая должна быть измерена в спектрометре; здесь предполагается что плотность энергии входного сигнала недостаточна для насыщения исследуемой среды.

Небольшое поглощение мощности может, например, наблюдаться с помощью приемника, в который входят линейный детектор и видеоусилитель. Если V_s — амплитуда напряжения сигнала на сопротивлении Z_0 , то напряжение на выходе приемника, имеющего во всем диапазоне усиление g_v равно

$$V_{\text{вых}} = g_v V_s. \quad (21)$$

При небольших изменениях V ,

$$\Delta V_{\text{вых}} = g_v \Delta V_s. \quad (22)$$

Амплитуда напряжения шумов приемника равна

$$V_N = \sqrt{8FkTZ_0\nu_b}, \quad (23)$$

где ν_b – ширина полосы в Гц.

Комбинируя (22) и (23), получаем критерий возможности детектирования

$$\Delta V_{\text{свнх}} = \sqrt{8FkTZ_0 v_b} . \quad (24)$$

Дифференцирование выражения для мощности

$$P = -\frac{V_s^2}{2Z_0} \quad (25)$$

дает

$$\Delta V_s = \frac{\Delta P Z_0}{V_s} = \frac{\Delta P \sqrt{Z_0}}{\sqrt{2P}} , \quad (26)$$

что вместе с (24) определяет

$$\Delta P_{\text{мин}} = \sqrt{16FkTv_b P_{\text{вх}}} e^{-\alpha t} . \quad (27)$$

Подобные расчёты проводятся при проектировании аппаратурной части спектрометров (детекторы, усилители и т.п.). При использовании же стандартного оборудования естественным является использование данных о чувствительности указанных в паспорте к приборам.

2.4. Методы измерения в линии передач

Существует множество параметров характеризующих линии передач, но основными параметрами, используемыми на практике, являются коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН, в формулах: $K_{\text{свн}}$, $K_{\text{стУ}}$, S) и коэффициент ослабления (A , A_x). Эти параметры в общем случае равны:

$$S = \frac{V_f + V_b}{V_f - V_b} = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} = \frac{Z_L}{Z_0} , \quad (28)$$

$$A_x [\text{дБ}] = 20 \lg(\rho) . \quad (29)$$

где ρ – коэффициент отражения/прохождения по напряжению, равен $\rho = V_b/V_f$.

Z_L – импеданс нагрузки;

Z_0 – импеданс линии передачи;

V_f – амплитуда прямой волны;

V_b – амплитуда отражённой/прошедшей волны [10, стр. 79-87; 11, стр. 35-46].

Детектирование амплитуды напряжения падающей и прошедшей волны производится с использованием направленных ответвителей с детекторными головками [см. стр. 22-25] (детектируется напряжение пропорциональное мощности сигнала, см. стр. 52-53).

Возможность определения КСВН и ослабления при помощи одних и тех же элементов позволяет реализовать схему измерения этих параметров в одном приборе.

В данной дипломной работе целью является получение спектров КСВН и ослабления, при исследовании различных сред в поглощающих ячейках.

Измерения характеристик материалов на сверхвысоких частотах проводятся не только для установления их возможного поведения в аппаратуре, но также и потому, что обнаруженные свойства материалов были интересны и позволяли определить их состав и молекулярную структуру. Существующие методы измерений обладают многими особенностями.

Свойства материалов можно выразить в значениях комплексной относительной магнитной проницаемости $\bar{\mu} = \mu' - j\mu''$ с тангенсом угла потерь $\operatorname{tg} \delta = \mu''/\mu'$ и комплексной относительной проницаемости $\bar{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$ с тангенсом угла потерь $\operatorname{tg} \delta = \epsilon''/\epsilon'$. Эти величины являются мерой поляризации, которой подвергаются материалы в приложенном поле. Во многих средах как $\bar{\mu}$, так и $\bar{\epsilon}$ изменяются с частотой, что дает дисперсию, которая может быть двух видов. Первая является релаксацией Дебая, которая возникает, когда частота

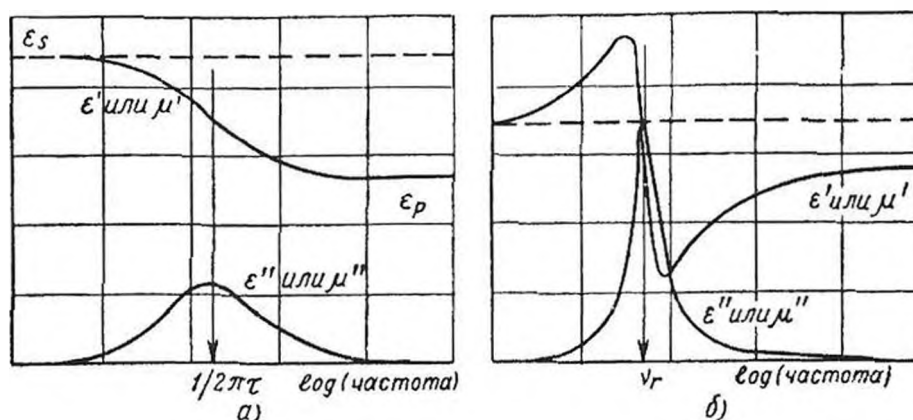


Рис. 16. Дисперсия и поглощение в диэлектрических средах. (Частота дана в логарифмическом масштабе).

увеличивается до такого значения, при котором поляризации не успевают установиться полностью до момента изменения направления приложенного поля. Таким образом, относительная магнитная проницаемость и относительная диэлектрическая проницаемость, как показано на рис. 16, а, медленно изменяются в области дисперсии с полосой общего поглощения, центр которой находится на частоте $\frac{1}{2\pi\tau}$. Второй вид дисперсии связан с квантовыми переходами $\Delta W = h\nu_r$, в атоме или молекуле с одного энергетического уровня на другой. Когда приложенная частота достигает величины ν_r , наступает резонанс, который сопровождается острым пиком поглощения, как показано на рис. 16, б; эти квантовые переходы характерны для эффектов Штарка и Зеемана.

Из рассмотрения здесь выпадают материалы ферромагнитного типа [см. приложение 1], поэтому $\bar{\mu}$ почти равно единице и здесь важно поведение материалов в электрическом поле.

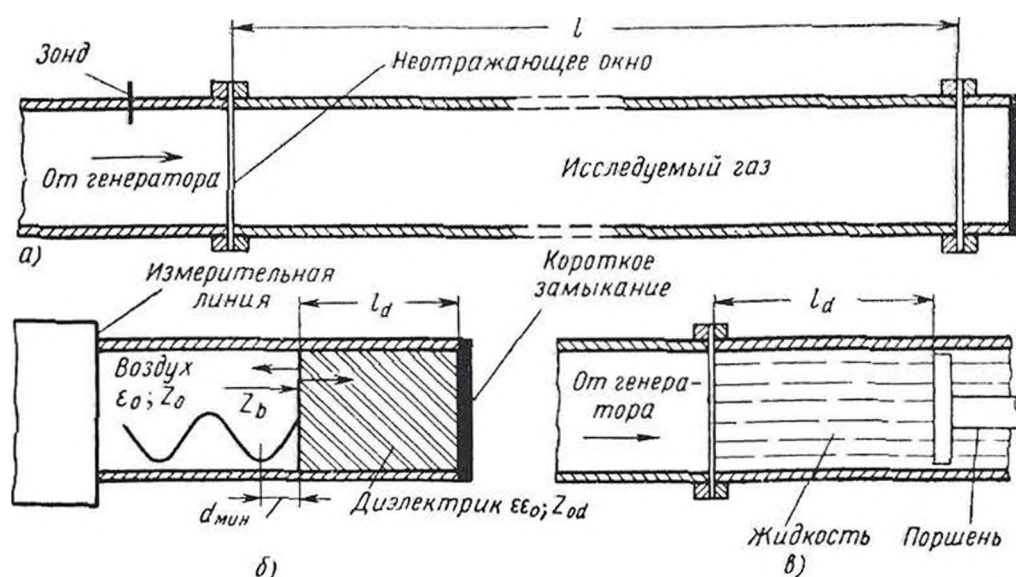


Рис. 17. Измерения характеристик диэлектриков в волноводах: а – элемент поглощения для газов; б – граничное отражение для твердых тел; в – граничное отражение для жидкостей.

Описаны многочисленные методы измерений с точки зрения теории и в практических деталях. Различные неполярные, полярные и дипольные диэлектрики могут существовать в виде газов, жидкостей или твердых тел, а также могут обладать высокими, средними или малыми потерями; измерения могут проводиться в широком диапазоне температур. Используемые методы можно разделить на методы измерений в свободном пространстве, в линии передачи и в объемном резонаторе [10, стр. 308-344].

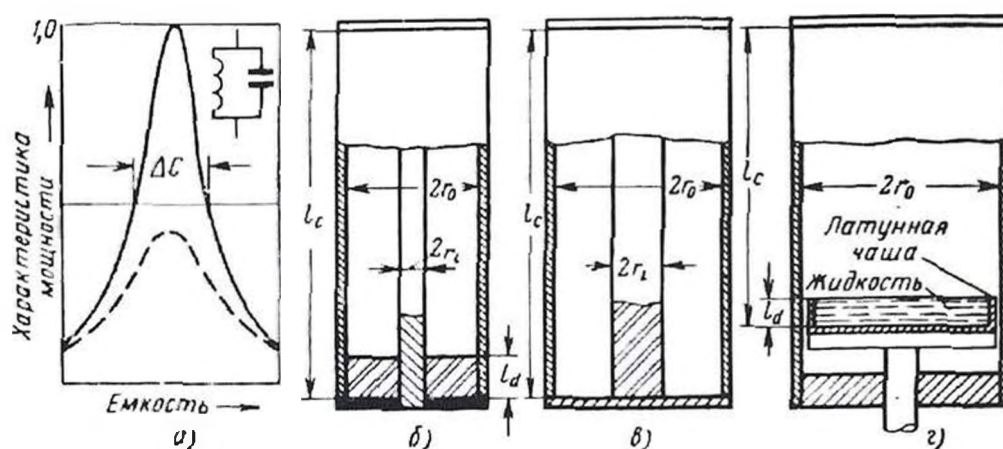


Рис. 18. Измерение свойств диэлектриков резонансными методами: *а* – типичные резонансные кривые; *б* – коаксиальный резонатор с колебаниями типа ТЕМ; *в* – круглый волноводный резонатор с колебаниями вида TM_{01} .

Отмеченные выше методы, в основном, опираются на метод определения положения максимумов стоячей волны, для чего использовались специально сконструированные волноводы, т.н. волномеры. Но использование панорамных измерителей КСВН и ослабления позволяет обойтись без использования волномеров. Смещение особенностей характеристик КСВН и ослабления можно наблюдать на экране осциллографического индикатора, что, в свою очередь, облегчает качественный анализ исследуемых объектов, и, главное, даёт возможность использовать автоматизированные регистрирующие устройства.

2.5. Основы ФМР в образцах с анизотропией формы

Резонансное поглощение магнитным кристаллом энергии электромагнитного поля (ферромагнитный резонанс) наблюдается при совпадении собственной частоты прецессии ω_0 и частоты внешнего возбуждающего поля ω . Собственная частота прецессии ω_0 зависит от формы образца, симметрии кристалла, типа магнитного упорядочения, магнитного состояния образца и от некоторых других факторов.

При выводе основных соотношений для восприимчивости и частоты исходят из динамического уравнения намагниченности $\vec{M}$ [19]:

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma \vec{M} \vec{H}_{\text{эфф}} + \frac{\alpha}{M} \cdot \frac{\vec{M} \partial \vec{M}}{\partial t} \quad (30)$$

где: $\vec{H}_{\text{эфф}}$ - эффективное магнитное поле внутри образца;

α - параметр затухания;

$\gamma = \frac{e}{2m_e c}$ - гиромагнитное отношение (для ферромагнетиков, парамагнетиков

$\frac{\gamma}{2\pi} \sim 2,8 \text{ МГц/э}$), e – заряд электрона, m_e - масса электрона, c – скорость света.

Для изотропного намагниченного до насыщения образца эффективное поле:

$$\vec{H}_{\text{эфф}} = \vec{H}_0 + \vec{H}_d + \vec{h} \quad (31)$$

где: $\vec{H}_0$ - внешнее постоянное поле;

$\vec{H}_d$ - дипольное (размагничивающее) поле;

$\vec{h}$ - переменное поле.

Для эллипсоида однородное размагничивающее поле можно записать в виде:

$$\vec{H}_d = -\hat{N}\vec{M}$$

где: $\hat{N}$ - размагничивающий фактор (является тензором второго ранга).

$$\hat{N} = \begin{vmatrix} N_x & 0 & 0 \\ 0 & N_y & 0 \\ 0 & 0 & N_z \end{vmatrix}, \quad N_x + N_y + N_z = 1 \quad (32)$$

Пусть переменное магнитное поле $\vec{h}$ изменяется по гармоническому закону $h = h \cdot e^{i\omega t}$. Тогда $\vec{H}_{\text{эфф}}$ можно представить в виде:

$$\vec{H}_{\text{эфф}} = (\vec{H}_0 - 4\pi\hat{N}\vec{M}_0) + (\vec{h} - 4\pi\hat{N}\vec{m}) \cdot e^{i\omega t}, \quad (33)$$

где: $\vec{m} = \hat{\chi} \cdot \vec{h}$, $\hat{\chi}$ - тензор восприимчивости.

Намагниченность состоит из постоянной $\vec{M}_0$ и переменной $\vec{m}$ составляющих:

$$\vec{M} = \vec{M}_0 + \vec{m} \cdot e^{i\omega t} \quad (34)$$

Подставляя (34) и (33) в уравнение (30), получаем:

$$\begin{aligned} m_x &= \chi_{xx} h_x + i\chi_{xy} h_y, \quad m_z = 0 \\ m_y &= \chi_{yy} h_y - i\chi_{xy} h_x, \quad \vec{m} = \hat{\chi} \cdot \vec{h} \end{aligned} \quad (35)$$

Компоненты тензора восприимчивости $\hat{\chi}$ имеют вид:

$$\begin{aligned} \chi_{xx,yy} &= \chi_0 \frac{\omega_0 \cdot [\omega_H + (N_{y,x} - N_z) \cdot \omega_M + i\alpha\omega]}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\alpha\omega \cdot \left[\omega_H + (N_x + N_y - 2N_z) \cdot \frac{\omega_M}{2} \right]} \\ \chi_{x,y} &= \frac{\omega_0 \omega}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\alpha\omega \cdot \left[\omega_H + (N_x + N_y - 2N_z) \cdot \frac{\omega_M}{2} \right]} \end{aligned} \quad (36)$$

где: $\chi_0 = \frac{\gamma M_0}{\omega_0}$; $\omega_H = \gamma H_0$; $\omega_M = \gamma 4\pi M_0$;

Тогда формула для резонансной частоты будет иметь следующий вид:

$$\omega_0 = \gamma \cdot \left[(H_0 + 4\pi M_0 \cdot (N_x - N_z)) (H_0 + 4\pi M_0 \cdot (N_y - N_z)) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (37)$$

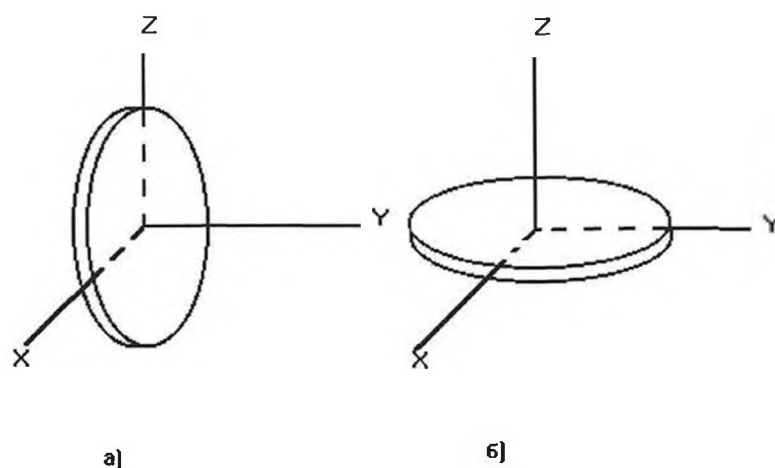


Рис. 19. Направление намагничения а) касательное, б) нормальное (линии напряжённости магнитного поля параллельны оси Z).

В таблице 1 приведены предельные случаи $\frac{\omega_0}{\gamma}$ (формулы Киттеля) [20 с. 890].

Таблица 1.

Образец	Направление намагничения	Рис.19.	Размагничивающие факторы			$\frac{\omega_0}{\gamma}$
			N_x	N_y	N_z	
Диск	Касательное, //	а	0	1	0	$[H_0(H_0 + 4\pi M_0)]^{\frac{1}{2}}$
	Нормальное, $\perp$	б	0	0	1	$H_0 - 4\pi M_0$

Определение намагниченности насыщения M_0 и гиромагнитного отношения является одной из целей при выполнении лабораторной работы «Ферромагнитный резонанс в образцах с анизотропией формы» [приложение 1.]

ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1. Стенд по ферромагнитному резонансу

Для наблюдения ферромагнитного резонанса требуется выполнение следующих условий: 1) Наличие источника внешнего магнитного поля ($\vec{H}_0$), с возможностью перестройки по напряжённости; 2) Источник переменного магнитного поля, с возможностью перестройки по частоте; 3) Возможность детектирования явления резонанса.

Внешнее магнитное поле формируется электромагнитом (ЭМ-1). Перестройка по напряжённости поля осуществляется при помощи стабилизированного источника постоянного тока (УИП-1).

Переменное магнитное поле реализуется при помощи генератора СВЧ колебаний с возможностью развёртки по частоте (ГКЧ-61).

Взаимодействие переменного и постоянного магнитных полей с ферритовым образцом происходит в специально сконструированном отрезке волновода (рис. 20.).

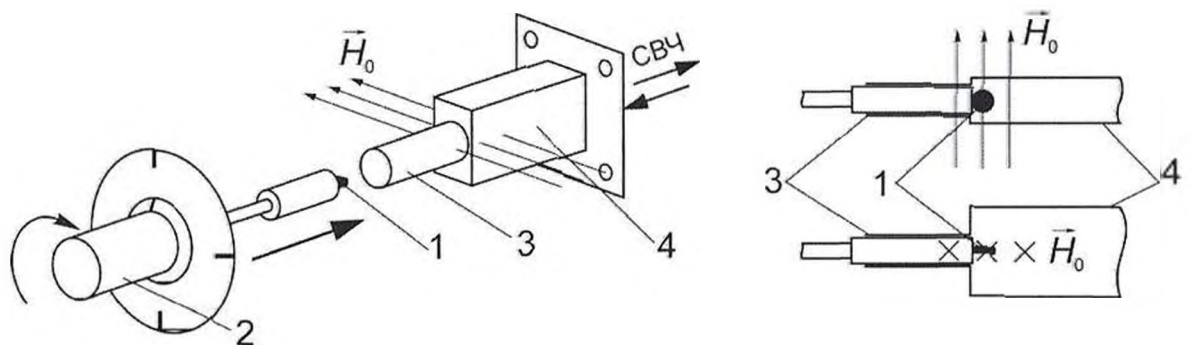


Рис. 20. Конструкция ячейки для исследования ферромагнитного резонанса. 1 – феррит; 2 – поворотное устройство с держателем для феррита; 3 – запердельный волновод ($d < \lambda_c$); 4 – волновод в который помещается феррит.

Расположение феррита вблизи стенки волновода обусловлено максимумом магнитной составляющей СВЧ волны вблизи короткозамкнутого торца волновода.

Детектирование резонанса производится по фиксированию минимума сигнала СВЧ волны (иначе максимума поглощения СВЧ волны) при помощи микровольтметра (ВЗ-56) присоединённого к детекторной секции волновода.

Схема установки по ферромагнитному резонансу представлена на рис.21.

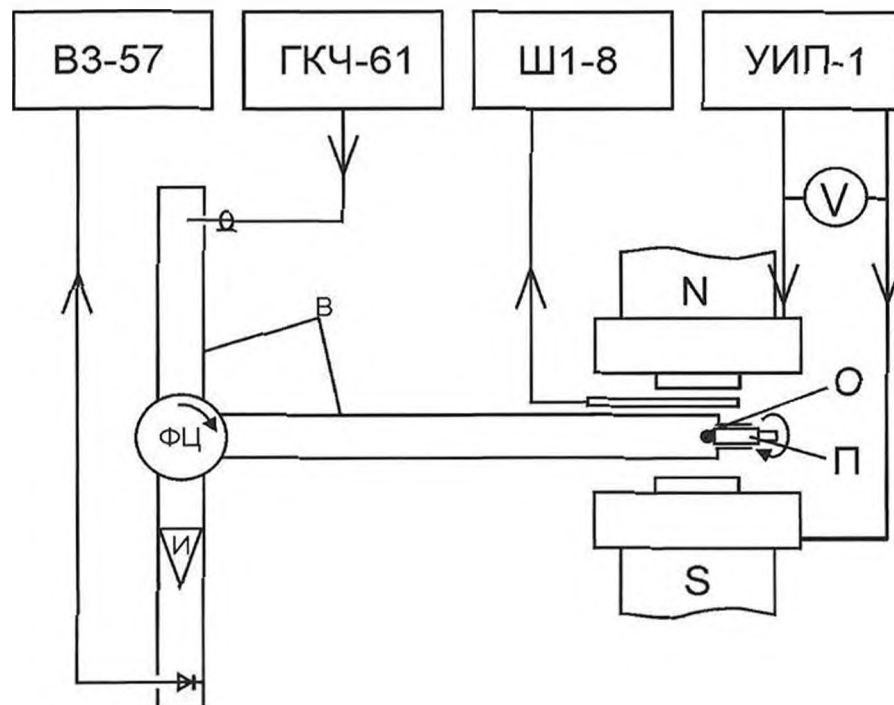


Рис. 21. Схема установки. Где: ВЗ-56 – милливольтметр; ГКЧ-61 – генератор сигналов высокой частоты; Ш1-8 – магнитометр; УИП – универсальный источник питания; N и S – полюса электромагнита ЭМ-1; В – волноводы; О – ферритовый образец; ФЦ – ферритовый циркулятор; И – изолятор; V – вольтметр; П – поворотное устройство.

3.2. СВЧ спектрометр

В работах [9, 21] описаны методы спектрального анализа активированных жидкостей, который заключался в регистрации кривых поглощения от исследуемых объектов. Эксперименты проводились в волноводных трактах в диапазоне 8,3 – 12,05 ГГц с использованием панорамного измерителя КСВН и ослабления Р2-61 (рис. 23.). Для автоматического снятия спектров поглощения

к индикатору подключался двухкоординатный самописец Н-307/2. При этом для увеличения чувствительности в блок развертки этого прибора по оси ординат встроена мостовая компенсационная схема [9, стр. 33], работающая от стабилизированного источника питания напряжением $U = 1,5 \text{ В}$.

В качестве измерительной ячейки использовался специально сконструированный отрезок волновода (рис. 22.) в который помещалась пробирка с исследуемой жидкостью.

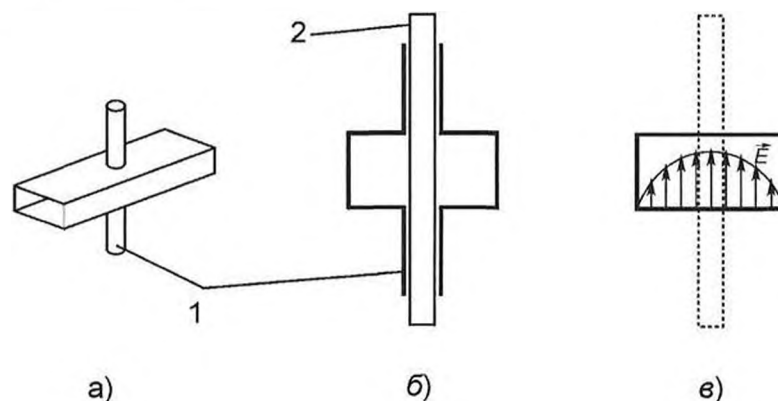


Рис. 22. Волноводная ячейка для исследования жидкостей: а) внешний вид; б) поперечное сечение волновода; в) распределение напряжённости электрического поля СВЧ волны в поперечном сечении волновода. Где 1 – запредельный волновод ($d < \lambda_c$), 2 – пробирка с исследуемой жидкостью.

В дополнение к данному методу в ходе работы был разработан целый ряд измерительных ячеек, часть из которых представлены далее.

На основании результатов работы [8] была изготовлена измерительная ячейка для исследования жидкостей в капиллярах (рис. 25.).

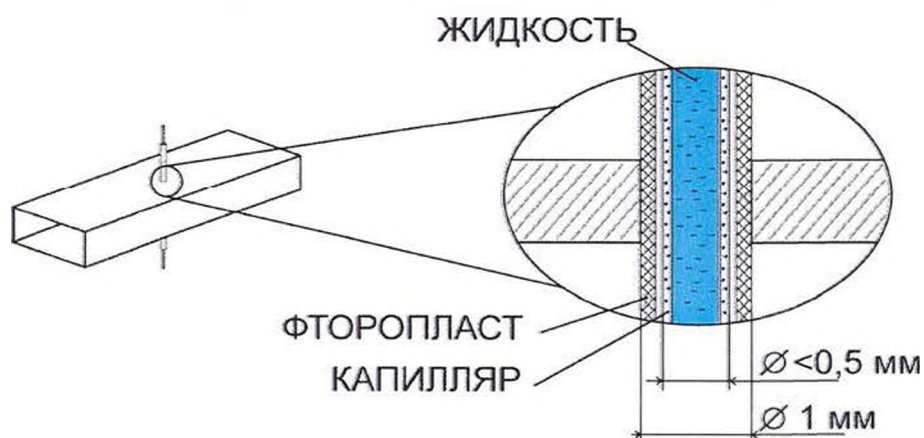


Рис. 25. Измерительная ячейка для исследования жидкостей в капиллярах.

В данной ячейке оказалось возможным отказаться от использования запредельных волноводов, т.к. согласно формуле [9, стр.34]:

$$L = \frac{20,8}{R} \left(\frac{\text{дБ}}{\text{мм}} \right), \quad (38)$$

где R – радиус отверстия в миллиметрах, L – удельное затухание, при диаметре отверстия 1 мм и толщине стенки волновода 2 мм, затухание волны в отверстии $\approx 83,2$ дБ.

Но при уменьшении объёмов исследуемой жидкости, потребовалось увеличение чувствительности регистрирующих приборов, для чего была усовершенствована компенсационная схема [9, стр. 33] в блоке развёртки по оси ординат самописца Н307/2, которая позволила фиксировать показания индикатора с точностью 0,5 мВ/см, при общем уровне сигнала индикатора порядка 0,5 В.

Конструкции ячеек для исследования жидкостей с использованием коаксиальных линий представлены на рис. 26.

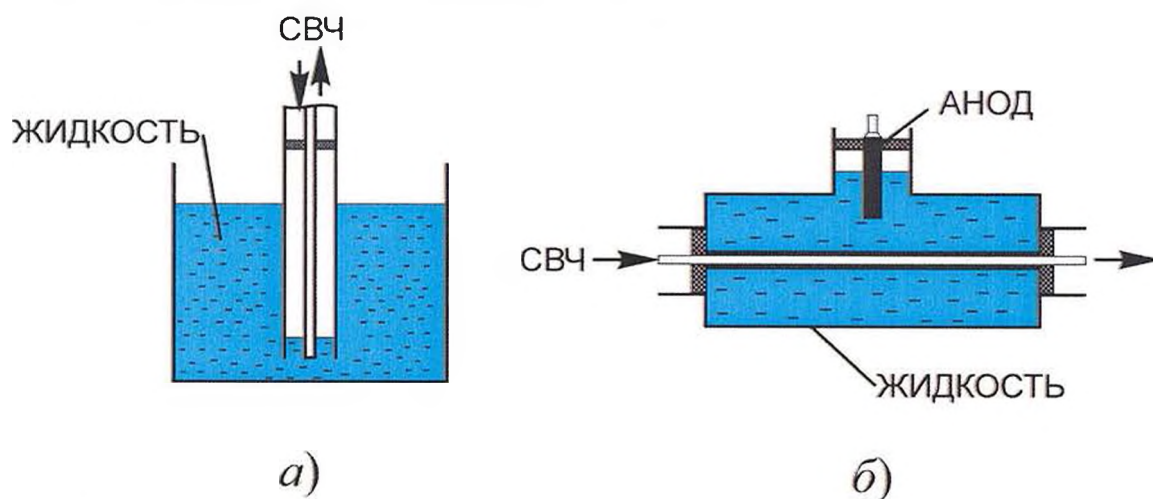


Рис. 26. Коаксиальные измерительные ячейки: а) на отражение (резонаторная); б) на прохождение (с возможностью активации жидкости непосредственно в процессе измерений).

Основываясь на результатах работ [8, 9, 21] и учитывая большую универсальность и информативность методов спектрального анализа, было решено, на базе существующих установок (лабораторных и исследовательских)

создать универсальный СВЧ – спектрометр для исследования электрических и магнитных свойств конденсированных веществ.

Для реализации установки было использовано следующее оборудование:

Таблица 2.

Измерительные линии типа P2	
Линия	Назначение
1. P2 – 52	Измеритель КСВН панорамный предназначен для измерения частотных характеристик КСВН и ослабления элементов волноводных каналов в диапазоне 1,07 – 2,14 ГГц. В состав входят Я2Р – 67, ГКЧ – 52, коаксиальная измерительная линия.
2. P2 – 60	Измеритель КСВН панорамный предназначен для измерения частотных характеристик КСВН и ослабления элементов волноводных каналов в диапазоне 5,6 – 8,3 ГГц. В состав входят Я2Р – 67, ГКЧ – 60, волноводная измерительная линия.
3. P2 – 61	Измеритель КСВН панорамный предназначен для измерения частотных характеристик КСВН и ослабления элементов волноводных каналов в диапазоне 8,3 – 12,05 ГГц. В состав входят Я2Р – 67, ГКЧ – 61, волноводная измерительная линия.
4. P2 – 78 ^(1, 2, 3)	Измеритель КСВН панорамный предназначен для панорамного отображения в линейном и логарифмическом режимах на экране индикаторного устройства и измерения частотных характеристик КСВН и коэффициента передачи элементов коаксиального волновода каналов 3,5/1,52 мм, 7/3,04 мм, 16/6,95 мм в диапазоне частот от 1,25 до 5,0 ГГц и канала 16/4,6 мм в диапазоне частот от 1,25 до 3,0 ГГц.
5. P2 – 114 ⁽¹⁾	Измеритель КСВН панорамный предназначен для панорамного отображения в линейном и логарифмическом режимах на экране индикаторного устройства и измерения частотных характеристик КСВН и коэффициента передачи элементов коаксиальных и волноводных трактов в диапазоне 2,0 – 8,3 ГГц.

⁽¹⁾ – обладает возможностью цифрового управления.

⁽²⁾ – возможность предварительной обработки информации.

⁽³⁾ – возможность вывода информации в цифровом виде.

Таблица 3.

Приборы входящие в состав измерителей КСВН и ослабления типа P2.

Прибор	Назначение
1. ГКЧ – 52	Генератор качающейся частоты предназначен для использования в качестве источника СВЧ сигнала в составе панорамного измерителя КСВН типа P2 в диапазоне частот 1,07 – 2,14 ГГц.
2. ГКЧ – 57	Генератор качающейся частоты предназначен для использования в качестве источника СВЧ сигнала в составе панорамного измерителя КСВН типа P2 в диапазоне частот 3,2 – 5,64 ГГц.
3. ГКЧ – 60	Генератор качающейся частоты предназначен для использования в качестве источника СВЧ сигнала в составе панорамного измерителя КСВН типа P2 в диапазоне частот 5,6 – 8,3 ГГц.
4. ГКЧ – 61	Генератор качающейся частоты предназначен для использования в качестве источника СВЧ сигнала в составе панорамного измерителя КСВН типа P2 в диапазоне частот 8,15 – 12,05 ГГц.

5. Я2Р – 75 ⁽¹⁾	Генератор качающейся частоты предназначен в качестве источника СВЧ сигнала в составе панорамных измерительных приборов. Диапазон 2,0 – 8,3 ГГц.
6. БИ (Р2 – 78)	Блок индикаторный предназначен для использования в составе панорамного измерителя КСВН и ослабления Р2-78.
7. ГКЧ2 (Р2-78)	Генератор качающейся частоты предназначен для использования в качестве источника СВЧ сигнала в составе панорамного измерителя КСВН и ослабления Р2-78. Диапазон частот 1,25 – 5,0 ГГц.
8. Я2Р – 67	Блок индикаторный предназначен для использования в составе панорамных измерителей КСВН и ослабления.
9. Я2Р – 70 ⁽¹⁾	Блок индикаторный предназначен для использования в составе панорамных измерителей КСВН и ослабления элементов коаксиальных и прямоугольных волноводов.

⁽¹⁾ – обладает возможностью цифрового управления.

⁽²⁾ – возможность предварительной обработки информации.

⁽³⁾ – возможность вывода информации в цифровом виде.

Таблица 4.

Регистрирующие устройства

Прибор	Назначение
1. Н-307/2	Прибор самопишущий двухкоординатный.
2. АЦП L – Card	Плата аналого-цифрового преобразователя L152, предназначена для оцифровки аналоговых сигналов.

Структурная схема панорамных измерителей КСВН и ослабления типа Р2 представлена на рис. 23.

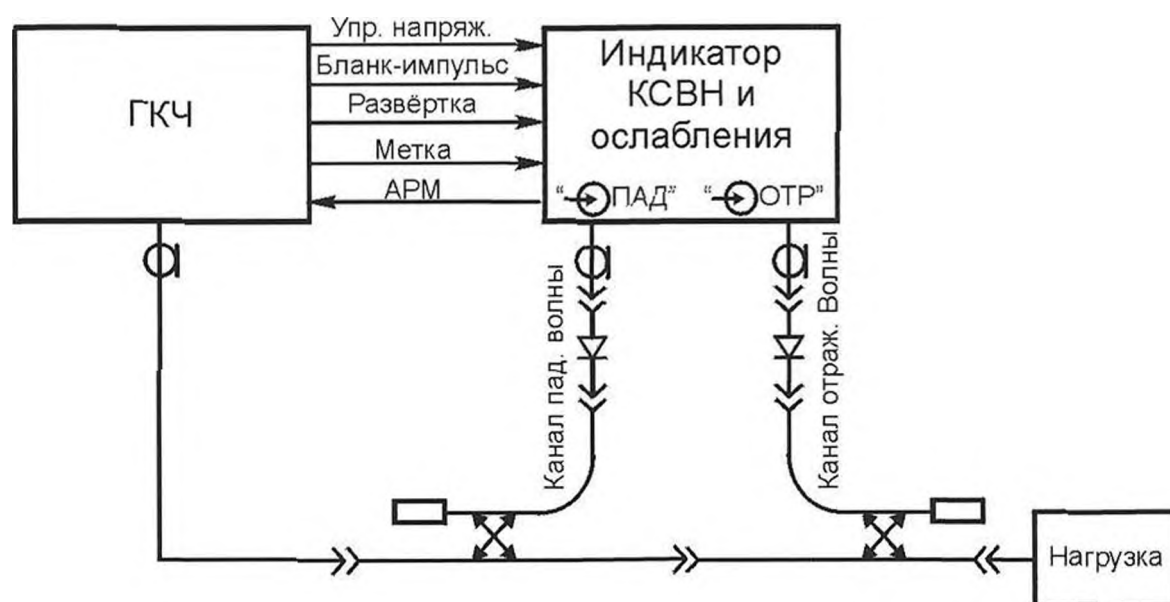


Рис. 23. Схема электрическая структурная панорамного измерителя КСВН, работающего по методу отдельного выделения падающей и отраженной волн с помощью направленных ответвителей.

В основу построения структурной схемы панорамного измерителя КСВН и ослабления положен принцип отдельного выделения и непосредственного детектирования сигналов падающей и отраженной волны. Способ отдельного выделения падающей и отраженной волн заключается в следующем.

Сигнал, пропорциональный мощности (квадратичное детектирование), падающей на нагрузку, выделяется направленным ответвителем (или мостовым рефлектором, для коаксиальной линии) падающей волны, точнее детекторной головкой, либо встроенной во вторичный тракт ответвителя, либо подключённой к нему. Сигнал, отраженный от исследуемой нагрузки, выделяется направленным ответвителем (или мостовым рефлектометром) отраженной волны.

Уровень напряжения на выходе детекторной головки направленного детектора падающей волны поддерживается постоянным системой автоматической регулировки мощности (АРМ, см. приложение 2.) генератора.

Коэффициент отражения определяется как отношение по формуле

$$\rho = \sqrt{\frac{U_{\text{отраж}}}{U_{\text{пад}}}}, \quad (39)$$

где ρ - модуль коэффициента отражения по напряжению;

$U_{\text{отраж}}$ - амплитуда продетектированного напряжения отраженной волны;

$U_{\text{пад}}$ - амплитуда продетектированного напряжения падающей волны.

Коэффициент стоячей волны ($K_{\text{СВН}}$) связан с коэффициентом отражения соотношением

$$K_{\text{СВН}} = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad (40)$$

СВЧ сигнал, поступающий на исследуемую нагрузку, промодулирован частотой 100 кГц. Ввиду этого, на выходах детекторов, детектирующих сигналы, пропорциональные мощности отраженной и падающей волн, имеется напряжение частотой 100 кГц. Эти напряжения используются в индикаторе для определения измеряемой величины.

Усиление напряжений падающей и отраженной волн в индикаторах осуществляется при помощи резонансных усилителей (на частоте модуляции СВЧ сигнала), что устраняет влияние формы модулирующего сигнала на характеристики индикатора и тем самым повышает чувствительность прибора. После детектирования и усиления сигналов происходит их деление, визуальная индикация на экране ЭЛТ и непосредственный отсчет по шкальному устройству, либо снятие показаний с индикаторов. Кроме того, в индикаторах имеются схемы, обеспечивающие логарифмический режим работы, компенсацию неидентичности частотных характеристик СВЧ трактов, индикацию частотной метки, а также выдачи управляющих сигналов при работе с цифровым блоком. Так же реализован выход аналоговых сигналов на внешнее регистрирующее устройство, например самописец.

Шкалы индикатора Я2Р-67 рассчитаны на квадратичность детектирования и проградуированы непосредственно в значениях КСВН и ослабления. В индикаторах Я2Р-75 и Р2-78 имеется цифровая индикация в значениях КСВН или ослабления.

Измерение КСВН и ослабления может производиться как в автоматическом, так и в ручном режимах перестройки частоты.

Блок-схема установки представлена на рис. 24.

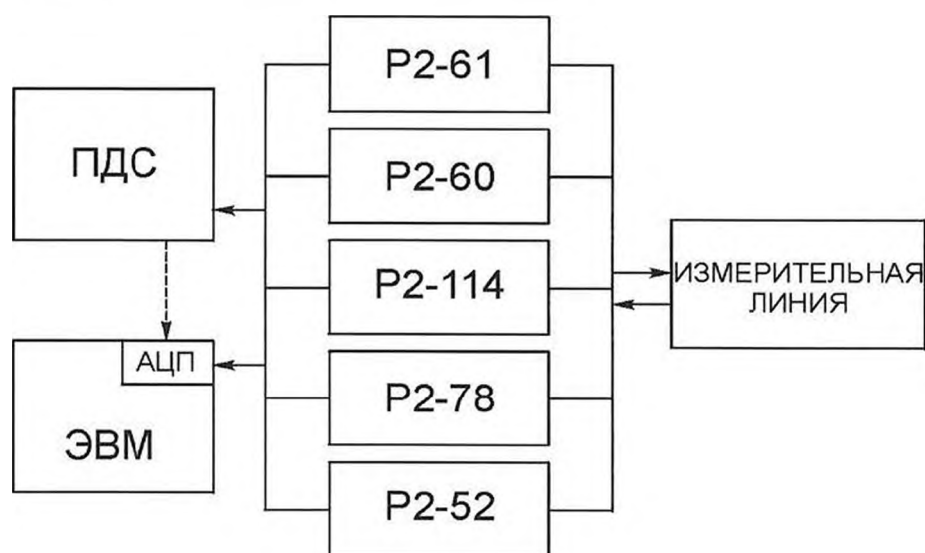


Рис. 24. Блок-схема установки. ПДС - прибор двухкоординатный самопишущий; АЦП - 16/32 канальный аналого-цифровой преобразователь. Рабочие диапазоны блоков Р2 представлены в таблице 2.



Рис. 30. Внешний вид установки.

Особое внимание следует уделить возможности фиксирования результатов измерений при помощи ЭВМ. Для этого используется аналого-цифровой преобразователь L-Card [см. приложение 2.], выполненный в стандарте IBM PC XT/AT в виде платы типа ISA (Industry-Standard Architecture).

Данная плата позволяет регистрировать сигналы с 16 дифференциальных каналов, либо с 32 каналов с общей «землёй». Также плата имеет несколько управляемых выходов, при помощи которых в дальнейшем возможна реализация автоматического управления измерительными приборами. Стыковка измерительных приборов со входами АЦП производится посредством коммутационного блока.

Программное обеспечение, управляющее АЦП L-Card, позволяет использовать его совместно с компьютером в качестве осциллографического индикатора, а также выводить массивы данных в файл для последующей обработки в других приложениях.

3.3. Кривые поглощения при ферромагнитном резонансе

Методика регистрации кривых поглощения описаны в лабораторной работе «Ферромагнитный резонанс в образцах с анизотропией формы» [приложение 1], здесь приводятся лишь характерные графики, получаемые в ходе выполнения работы.

Регистрация данных зависимостей возможна и в автоматическом режиме, как с использованием самописца, так и при помощи компьютера. Но целью работы является не только определение параметров исследуемого вещества, а, как и в большинстве других лабораторных работ, получение навыков работы с измерительной аппаратурой, ознакомление с принципом работы приборов и т.п. Поэтому в ходе выполнения работы регистрация данных выполняется в основном вручную.

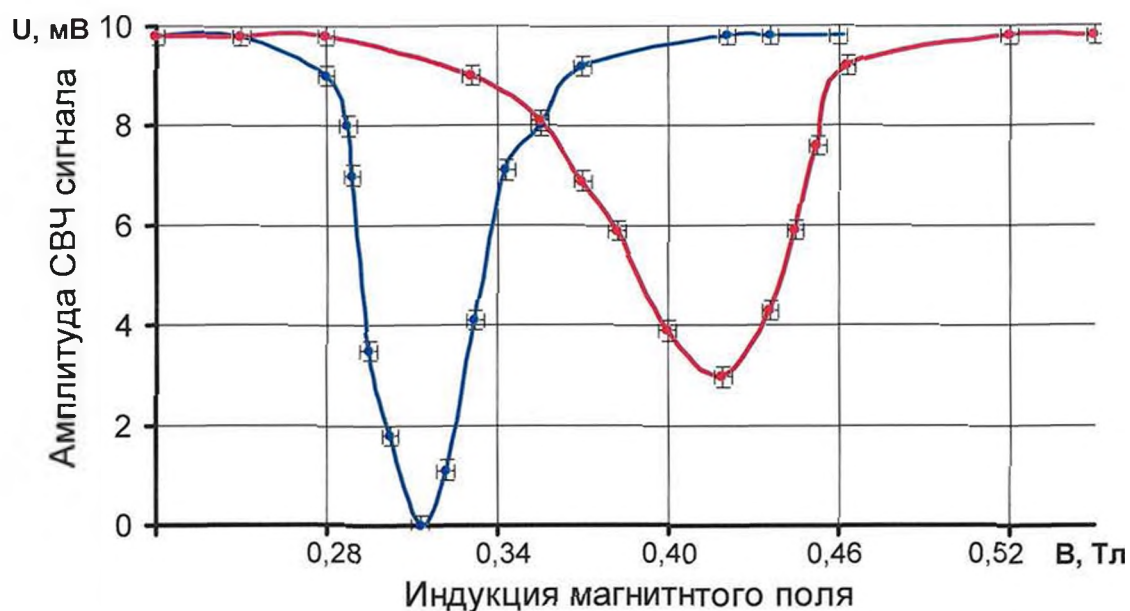


Рис. 27. Зависимость амплитуды отражённой СВЧ волны от напряжения, подаваемого на электромагнит (иначе от индукции магнитного поля). — нормальное намагничение, — касательное намагничение (рис. 19.).

3.4. Кривые поглощения жидкостей при различных условиях

Методика регистрации кривых поглощения идентична описанной в работе [9] (приготовление растворов, обработка, снятие данных). Различие заключается в том, что при изменении диапазона сканирования для измерений используются измерительная линия и панорамный измеритель КСВН и ослабления соответствующие данному диапазону. Подключение выходов индикаторов к регистрирующей аппаратуре производится при помощи стандартных коаксиальных кабелей К-9 (к самописцу напрямую к блокам развертки, к плате L-Card через коммутационный блок).

1. При регистрации кривых при помощи компьютера, их отображение возможно непосредственно в окне программы управления, а обработку удобнее проводить в более специализированных приложениях (Maple, MS Excel и т.п.), для этого данные выводятся в отдельный файл в виде массивов. На рис. 28. Советское радио, 1966. - 528 с.

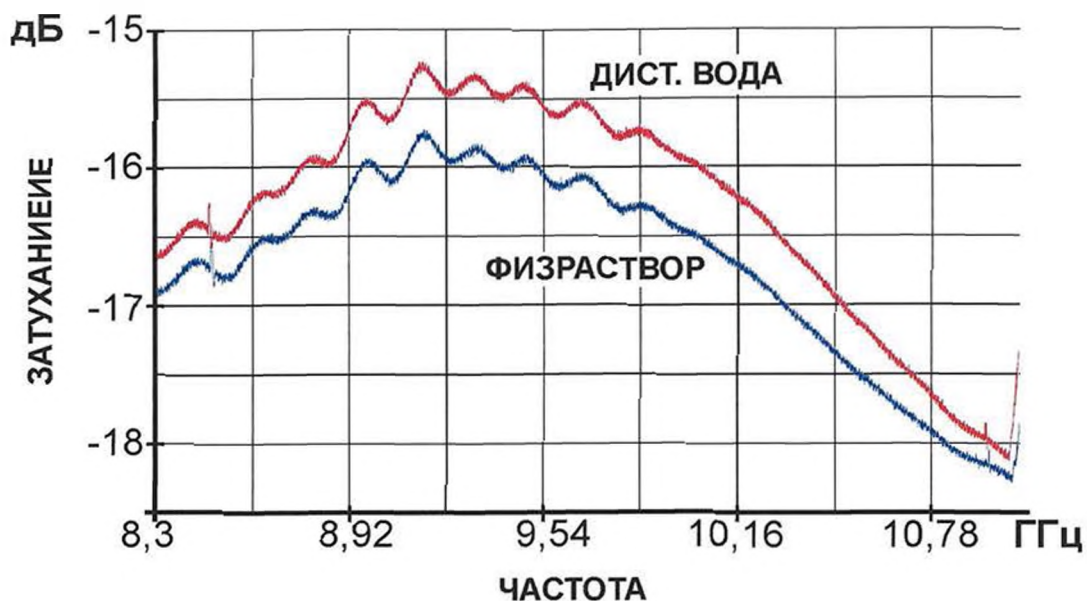


Рис. 28. Кривые поглощения физраствора и дистиллированной воды в пробирках.

Большей чувствительности можно добиться использованием двухкоординатного самописца, который обладает дополнительными усилителями в блоках развёртки. Что, в свою очередь, позволило проводить исследования жидкостей в капиллярах (потребовалась незначительная доработка блока развёртки по оси Y). Характерные графики, регистрируемые при помощи самописца, представлены на рис.29. (использовалась измерительная ячейка изображённая на рис. 22.).

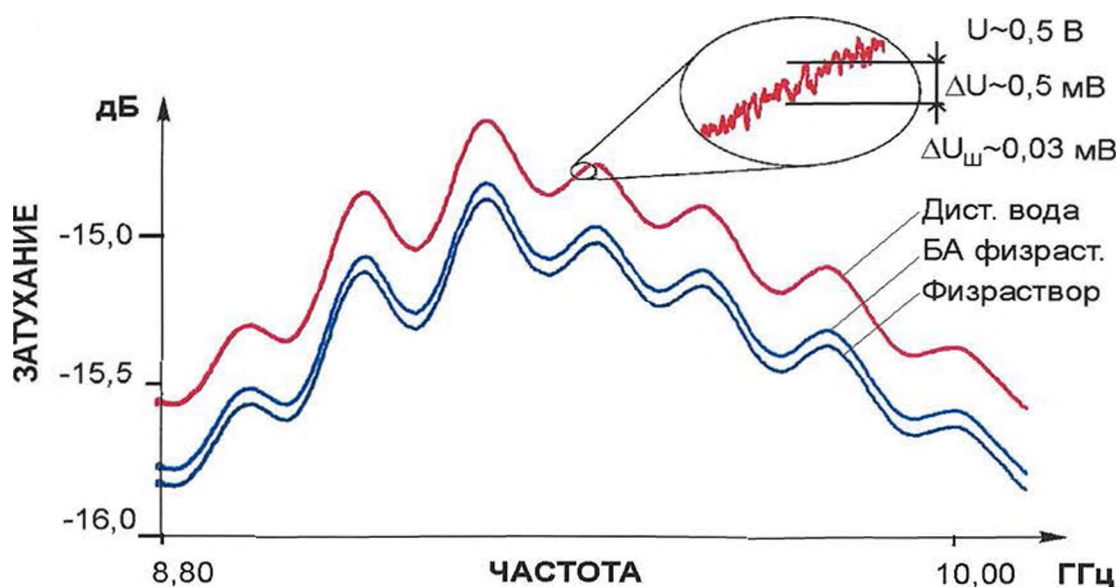


Рис. 29. Кривые поглощения, регистрируемые самописцем при исследовании жидкостей в пробирках.

Такой же чувствительности можно добиться и при регистрации кривых с помощью АЦП L-Card, для чего необходимо использовать дополнительные усилители, встраиваемые в коммутационный блок, либо использовать в качестве усилителей блоки развёртки самописца, но эти возможности на данный момент не реализованы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время актуальной и интересной темой является изучение спектральных свойств неравновесных конденсированных сред и их динамики во времени. Ввиду чрезвычайной сложности в построении более точной теоретической модели становятся принципиально важными вопросы исследования спектров испускания и поглощения жидких сред, что приводит к необходимости проведения более детальных экспериментов в этой области.

Поэтому данная дипломная работа посвящена разработке установки для спектрального СВЧ анализа конденсированных веществ в диапазоне частот 1 – 12 ГГц, позволяющая в реальном масштабе времени снимать спектры поглощения: ФМР, контактно и бесконтактно активированных жидкостей и иных веществ. Автоматизация сбора данных на СВЧ – спектрометре с использованием самопишущих приборов и аналого-цифрового преобразователя ЭВМ позволяет фиксировать быстропротекающие процессы, а также проводить длительные эксперименты без необходимости постоянного контроля человеком.

В ходе выполнения дипломной работы были получены следующие результаты:

1. Разработан стенд и методическое руководство для проведения лабораторной работы «Ферромагнитный резонанс в образцах с анизотропией формы».
2. Собрана уникальная установка для проведения спектрального СВЧ анализа конденсированных веществ в диапазоне 1,02 – 12,05.
3. Проведена автоматизация сбора данных с СВЧ – спектрометра с использованием самопишущих приборов и аналого-цифрового преобразователя ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев П.Н. Избранные сочинения / Под ред. А.К. Тимирязева. - М.- Л.: Гостехиздат, 1949. - 244 с.
2. Широносков, В.Г. Сборный доклад / В.Г. Широносков // Электрохимическая активация в медицине, сельском хозяйстве, промышленности: 1-й Международный симпозиум. - М.: ВНИИМТ АО НПО "Экран". 1997. - 220 с.
3. Широносков, Е.В. Бесконтактная активация жидких сред / Е.В. Широносков // Дипломная работа. Ижевск, УдГУ, каф. Биомедфизики. 2000.
4. Широносков, В.Г. Задача двух магнитных диполей с учетом уравнений движений их спинов / В.Г. Широносков // Изв. вузов, Физика. - 1985. - №7. С. 74 - 78.
5. Широносков, В.Г. Резонанс в физике, химии и биологии / В.Г. Широносков. - Ижевск: Изд-во Удмурт., ун-та, 2001. - 92 с.
6. Герловин, И.Л. Основы единой теории всех взаимодействий в веществе / И.Л. Герловин. - Л.: Энергоатомиздат, 1990. - 432 с.
7. Козорез, В.В. Динамические системы магнитно взаимодействующих свободных тел / В.В. Козорез. - Киев: Наукова думка, 1981. - 140 с.
8. Фесенко, Е.Е. О необычных спектральных свойствах воды в тонком слое / Е.Е. Фесенко, Е.Л. Терпугов // Биофизика. - 1999. - Т. 44, №1. - С. 5-9.
9. Коновалова, Н.А. СВЧ – методы исследования жидкостей / Н.А. Коновалова // Дипломная работа. Ижевск, УдГУ, каф. Биомедфизики. 2002.
10. Харвей, А.Ф. Техника сверхвысоких частот / А.Ф. Харвей. - М.: Советское радио, 1965. - 784 с.
11. Воскобойник, М.Ф. Техника и приборы СВЧ / М.Ф. Воскобойник, А.И. Черников. - М.: Радио и связь, 1982. - 208 с.
12. Вамберский, М.В. Передающие устройства СВЧ / М.В. Вамберский, В.И. Казанцев, С.А. Шелухин. - М.: Высшая школа, 1984. - 448 с.

13. Хиппель, А. Диэлектрики и волны / А. Хиппель. - М.: Иностранная литература, 1960. - 440 с.
14. II Съезд биофизиков России 22-29 августа 1999 Москва
<http://mars.biophys.msu.ru/scripts/trans.pl/koi/cyrillic/Progr2.htm>; http://www.biophys.msu.ru/scripts/trans.pl/WIN/cyrillic/rbpd99/10_BP99/10_OBZOR/10_OTCHET.HTM.
15. Советский Энциклопедический Словарь / А.М. Прохоров, И.В. Абашидзе, П.А. Азимов и др.; Глав. ред. А.М. Прохоров. – 4-е изд., испр., доп. - М.: Советская энциклопедия, 1990. - 1632 с.
16. Киселев, Б.И. Метод адаптивного лечения / Б.И. Киселев. - С-П.: Комплекс, 1997. - 9 с.
17. Киселев, Б.И. Способ обработки физиологического раствора Киселева Б.И. а.с. № 1827274, кл. А61 № 5/06 от 13.10.1992.
18. Давид, Р. Введение в биофизику / Р. Давид. - М.: Мир, 1982. - 207 с.
19. Гуревич, А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках / А.Г. Гуревич. - М.: Наука, 1973. - 592 с.
20. Вонсовский, С.В. Магнетизм / С.В. Вонсовский. - М.: Наука, 1971. - 1032 с.
21. Меньшикова, С.Г. Влияние активированных растворов на свойства эритроцитов периферической крови человека / С.Г. Меньшикова // Дипломная работа. Ижевск, УдГУ, каф. Биомедфизики. 2002.
22. Окресс, Э. СВЧ – энергетика: В 3 т. / Э. Окресс. - М.: Мир, 1971. - Т.3. - 248 с.
23. Марков, Г.Т. Электродинамика и распространение радиоволн / Г.Т. Марков, Б.М. Петров, Г.П. Грудинская. - М.: Советское радио, 1979. - 376 с.
24. Бредов, М.М. Классическая электродинамика / М.М. Бредов, В.В. Румянцев, И.Н. Топтыгин. - М.: Наука, 1985. - 400 с.
25. Автоматизация радиоизмерений / Под ред. В.П. Балашова. - М.: Советское радио, 1966. - 528 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

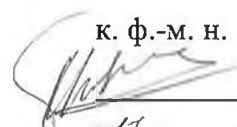
Методическое руководство к лабораторной работе
«Ферромагнитный резонанс в образцах с анизотропией формы»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Зав кафедрой биомедфизики,

к. ф.-м. н.

 В.Г. Широносов

“17” 05 2001 г.

ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ОБРАЗЦАХ С
АНИЗОТРОПИЕЙ ФОРМЫ

Методические указания

Ижевск – 2002

Указания рассмотрены и утверждены методической комиссией кафедры «Биомедфизика» физического факультета.

Протокол № 05/7 от "17" 05 2007 г.

Председатель методической комиссии кафедры биомедфизики, к.ф.-м. н. В.Г. Широносков

В методических указаниях содержится описание лабораторной работы по потоковому курсу «Радиофизика» для студентов 4-го курса физического факультета. Даны краткие теоретические сведения и подробно изложена методика выполнения экспериментальной части работы.

Работа может быть использована студентами, аспирантами, и специалистами других специальностей, занимающихся изучением радиофизики.

Работу подготовили:



Курганович В.С.
Широносков Е.В.

Цель работы: 1) Снятие линий поглощения при касательном и нормальном намагничении.
2) Определение намагниченности насыщения – M_0 и гиромагнитного отношения – γ .

Приборы и материалы: электромагнит (ЭМ-1), универсальный источник питания (УИП-1), магнитометр – измеритель интенсивности магнитного поля (Ш1-8), генератор качающейся частоты (ГКЧ-61), микровольтметр (ВЗ-57), ферритовый циркулятор (ФЦ), волноводы, ферритовый образец.

ВВЕДЕНИЕ

Резонанс (французский resonance, от латинского resono – откликаюсь) - это резкое возрастание амплитуды установившихся вынужденных колебаний при приближении частоты внешнего гармонического воздействия к частоте одного из собственных колебаний системы ([7] с.1125).

Ферромагнитный резонанс - это избирательное поглощение ферромагнетиком энергии электромагнитного поля при частотах (обычно радиодиапазона), совпадающих с частотой собственной прецессии магнитного момента ферромагнетика ([7] с.1423).

Ядерный магнитный, электронный парамагнитный (ЯМР и ЭПР), а так же ферромагнитный резонансы (ФМР), несмотря на то, что наблюдаются на разных объектах (ядрах и электронах соответственно) и характеризуются разными частотами, описываются, по сути дела, одной и той же теорией (уравнениями типа Блоха) ([4], с. 4; [5]; [6], с.172).

Основу магниторезонансных методов составляет поглощение энергии электромагнитных волн микроволнового и радиочастотного диапазонов в присутствии внешнего постоянного магнитного поля.

Ядерный и электронный магнитный резонанс – представляет собой весьма чувствительный метод; в ходе измерений образец не разрушается, а необходимые его количества очень малы. С помощью ЯМР исследуют самые разные процессы и определяют самые разные величины, например:

- кинетику роста кристаллов в растворах или, напротив, кинетику их растворения;
- процессы полимеризации, например, синтетических смол;
- процессы гидратации и дегидратации, определение содержания воды в различных веществах при данных условиях;
- определение содержания свободных радикалов.

При помощи ЭПР можно изучать объекты, обладающие не спаренными электронами; таковыми являются свободные радикалы и соединения, включающие ионы переходных металлов. ЭПР – это очень чувствительный метод, позволяющий проводить измерения с достаточно малыми количествами образца, который к тому же не обязательно должен быть гомогенным.

С использованием ФМР возможно определение составных элементов (веществ) исследуемых образцов, изучение структуры и свойств образцов обладающих ферромагнитными свойствами.

Методы ЭПР, ФМР и ЯМР – неразрушающие методы контроля, позволяющие анализировать структуру исследуемых объектов и их изменение.

1. ТЕОРИЯ.

1.1. Общие сведения о магнитоупорядоченных средах.

Все вещества являются магнитными. Результирующий магнитный момент единицы объёма принято называть намагниченностью:

$$\vec{M} = \sum_i \vec{\mu}_i$$

где $\vec{\mu}_i$ - магнитный момент i – магнитного диполя в единице объёма.

Атомными носителями магнетизма в веществе являются “элементарные” частицы – электроны, нуклоны (протоны и нейтроны) и заряженные частицы. Одни из них обладают собственным механическим моментом движения спином и соответственно магнитным моментом, а другие за счёт своего движения по “орбите” приводят к наведённому орбитальному магнитному моменту, например: электрон в атоме.

Диамагнитный эффект является результатом индукционного воздействия внешнего магнитного поля на движущиеся заряженные частицы. В каждом атоме возникает добавочный магнитный момент, направленный против создающего его внешнего поля, что и определяет отрицательный знак диамагнитной восприимчивости.

Намагниченность является функцией внешнего магнитного поля. Для некоторых веществ в определённом интервале полей, температур и при квазистатическом характере всего процесса намагничивания¹ эта зависимость носит простой линейный характер:

$$\vec{M} = \chi \vec{H}$$

где χ - магнитная восприимчивость вещества, которая зависит от температуры по закону Кюри ($\chi = C/T$ где C – постоянная Кюри, T – температура), $\vec{H}$ – внешнее магнитное поле.

Исходя из знака и величины магнитной восприимчивости χ , магнетики можно разделить на три основных типа: 1) диамагнетики ($\chi_d < 0$), 2) парамагнетики ($\chi_p > 0$), 3) ферромагнетики ($\chi_f \gg \chi_p$).

Ферромагнетики – магнитные вещества, в которых собственное (внутреннее) магнитное поле может в сотни и тысячи раз превосходить вызвавшее его внешнее магнитное поле. Для них характерна спонтанная (возникающая при отсутствии внешнего магнитного поля) параллельная ориентация элементарных магнитных моментов, приводящая к большой намагниченности.

Большая величина намагниченности ферромагнетиков объясняется существованием в них “молекулярного” магнитного поля, обусловленного особым квантовомеханическим (обменным) взаимодействием нескомпенсированных спиновых магнитных моментов электронов, атомов в кристаллических решётках ферромагнетиков. В результате этого взаимодействия устойчивым и энергетически выгодным состоянием системы электронов в кристалле является упорядоченное состояние с параллельной (ферромагнетизм) и антипараллельной (антиферромагнетизм) ориентацией спиновых магнитных моментов соседних атомов в решётке. На рис.1. показаны различные типы упорядоченного расположения магнитных моментов:

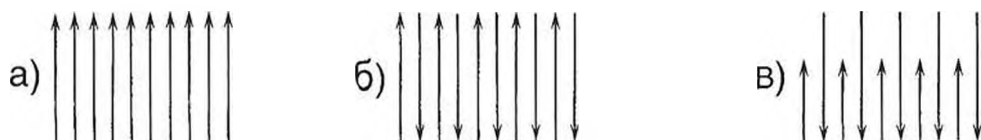


Рис. 1. а) ферромагнетик; б) антиферромагнетик; в) ферримагнетик.

¹)– вопрос о связи $\vec{M}$ и $\vec{H}$ в быстропеременных полях требует особого рассмотрения (см. [1] с. 54; [2] с. 102)

Ферромагнитны некоторые металлы: железо, никель, кобальт, гадолиний. Ферромагнетизм наблюдается и в некоторых неметаллических соединениях: окислах, галогенидах и более сложных соединениях.

К магнитоупорядоченным веществам относятся также антиферромагнетики. Они не обладают, как правило, спонтанной намагниченностью. Их магнитная восприимчивость невелика. Но, тем не менее, весь комплекс свойств антиферромагнетиков свидетельствует о наличии упорядоченности в расположении их элементарных магнитных моментов. В простейшем случае это может быть “шахматное” упорядочение, когда каждый магнитный момент окружён моментами, антипараллельными ему. Антиферромагнитны некоторые металлы (Cr, Mn, Ce, Pr, Nd, Eu) и сплавы.

Интересный и очень важный с практической точки зрения класс магнитоупорядоченных веществ составляют ферримагнетики. В них упорядочение магнитных моментов носит антиферромагнитный характер, т.к. соседние моменты антипараллельны, но из-за различия величин моментов, направленных в противоположные стороны, имеет место большой результирующий (спонтанный) момент. Ферримагнетизм характерен для неметаллических соединений. Многие неметаллические ферримагнетики нашли широкое применение в технике. Благодаря малой электропроводности они успешно применяются в системах, в которых происходят быстропротекающие импульсные процессы или колебательные процессы высоких и сверхвысоких частот. Последнее обстоятельство делает изучение динамики магнитной системы ферримагнетиков особенно актуальным.

Следует отметить, что различные виды магнитоупорядочения существуют лишь в определённых интервалах изменения температуры, давления, внешнего магнитного поля. В простейшем случае ферромагнитный или антиферромагнитный порядок имеет место (при отсутствии внешнего поля) в интервале температур от 0 К некоторой критической, характерной для данного вещества температуры, называемой температурой Кюри T_K (для ферромагнетиков) и температурой Нееля T_N (для антиферромагнетиков). Температуры T_K для ферромагнетиков и T_N для антиферромагнетиков являются точками фазового перехода второго рода. При этой температуре ферромагнетик становится парамагнетиком, изменяются структура кристаллической решётки, теплоёмкость, электропроводность и другие физические характеристики.

Ферромагнитный образец при температуре ниже точки Кюри и в отсутствии внешнего магнитного поля разбивается на малые области – домены, каждый из которых обладает собственной спонтанной намагниченностью. Но ввиду того, что векторы намагниченности доменов составляющих образец направлены во все стороны с одинаковой вероятностью (т.е. не существует какого-то выделенного направления для векторов намагниченности), совокупный момент равен нулю. И только в присутствии внешнего магнитного поля начинается ориентация векторов намагниченности доменов вдоль поля и в образце возникает результирующий магнитный момент.

По сравнению с парамагнетиками для магнитоупорядоченных веществ наблюдается магнитный гистерезис - отставание изменения магнитной индукции B от изменения напряженности внешнего намагничивающего поля, обусловленное зависимостью B от ее предыдущих значений. Магнитный гистерезис – следствие необратимых изменений при намагничивании и перемагничивании доменов. Причинами магнитного гистерезиса являются необратимые процессы смещения границ между областями самопроизвольной намагниченности и процессы вращения:

- 1) процесс смещения границ - он состоит в росте объемов доменов, у которых намагниченность ориентирована наиболее близко к направлению внешнего поля, за счет объемов соседних доменов;
- 2) процесс вращения - изменение направления спонтанной намагниченности отдельных доменов или всего кристалла в целом путем поворота вектора намагниченности насыщения.

Петлей гистерезиса (рис.2) - называется кривая изменения намагниченности ферромагнитного тела, помещенного во внешнее магнитное поле, при изменении напряженности от $+H_0$ до $-H_0$, и обратно, где H_0 - напряжённость магнитного поля, соответствующее насыщению.

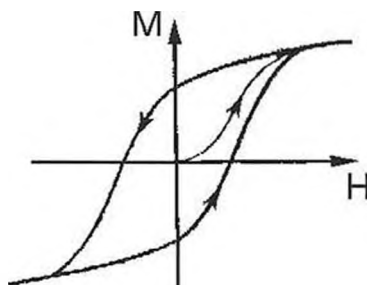


Рис. 2. Где M – намагниченность, H – напряженность магнитного поля.

1.2. Основы магнитного резонанса.

1.1.1. Элементарная теория магнитного резонанса.

Рассмотрим теорию магнитного резонанса на более простом примере – поведение магнитной стрелки при суперпозиции постоянного H_0 и переменного $H_{1,-1}$ магнитных полей (коэффициенты 1, -1 соответствуют продольной и поперечной накачке соответственно).

Для этого необходимо получить уравнение движения магнитного диполя с магнитным моментом $\vec{\mu}$ и моментом инерции I при данной конфигурации однородных магнитных полей (условие на однородность магнитных полей существенно упрощает теоретические выкладки).

Запишем составляющие магнитного поля:

$$\vec{H}_0 = \vec{H}_z \text{ и } \vec{H} = (0, H_{-1} \cos(\tau + \varphi), H_1 \cos \tau)$$

где: $\tau = \omega t$, $H_{1,-1}$ - амплитуда продольной и поперечной накачки.

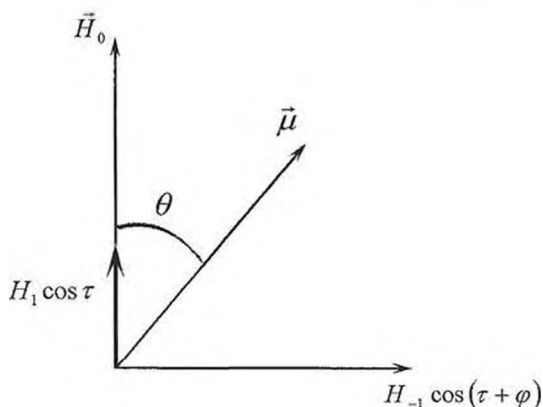


Рис. 3. Ориентация векторов напряжённости магнитного поля H_0 , $H_{1,-1}$ и магнитного момента $\vec{\mu}$ диполя в двумерном случае.

Учитывая диссипацию и вид потенциальной энергии магнитного диполя в форме:

$$U = -\vec{\mu} \vec{H}$$

можно получить уравнение движения в виде:

$$\ddot{\theta} + \varepsilon_r \dot{\theta} + \left(\frac{\mu H_0}{I} + \frac{\mu H_1}{I} \cos \tau \right) \sin \theta - \frac{\mu H_{-1}}{I} \cos(\tau + \varphi) \cdot \cos \theta = 0 \quad (1)$$

Введём следующие обозначения: $\varepsilon_k = \frac{\mu_k H}{I}$, $k=0,1,-1$, и перепишем уравнение (1) в виде:

$$\ddot{\theta} + \varepsilon_r \dot{\theta} + (\varepsilon_0 + \varepsilon_1 \cos \tau) \sin \theta - \varepsilon_{-1} \cos(\tau + \varphi) \cdot \cos \theta = 0 \quad (2)$$

Данное уравнение, в качестве модельного, часто встречается в различных областях физики – механике, электродинамике и т.д. В частности, для маятника с колеблющейся точкой подвеса $\varepsilon_k = \frac{a_k}{\omega^2 l}$, где $k=0,1,-1$, a_0 – ускорение силы тяжести, $a_{1,-1}$ – амплитуда продольной и поперечной вибрации. При малых углах отклонения θ и $\varepsilon_{-1} = 0$ уравнение (2) сводится к хорошо известному уравнению Матье, которое допускает устойчивое состояние перевернутого маятника и параллельно ориентированных магнитных диполей в зоне параметрического резонанса. Рассмотрим случай поперечной накачки ($\varepsilon_1 = 0$). При малых углах $\theta \approx 0$ (при малых амплитудах накачки, т.е. $\varepsilon_{-1} \ll \varepsilon_0, \varepsilon_r$) получим уравнение:

$$\ddot{\theta} + \varepsilon_r \dot{\theta} + \varepsilon_0 \theta = \varepsilon_{-1} \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

С помощью метода комплексных переменных, решая (3), получим решение для θ в виде:

$$\theta = \theta_1 \cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

$$\theta_1 = \frac{\varepsilon_{-1}}{\sqrt{\omega^2 \varepsilon_r + (\varepsilon_0 - \omega^2)^2}}$$

Из формулы (4) следует, что резонанс для стрелки в магнитном поле наблюдается, когда частота внешнего магнитного поля ω равна её собственной частоте колебаний ω_0 (см. рис.4):

$$\omega = \omega_0 = \varepsilon_0^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{\mu H_0}{I} \right)^{\frac{1}{2}}$$

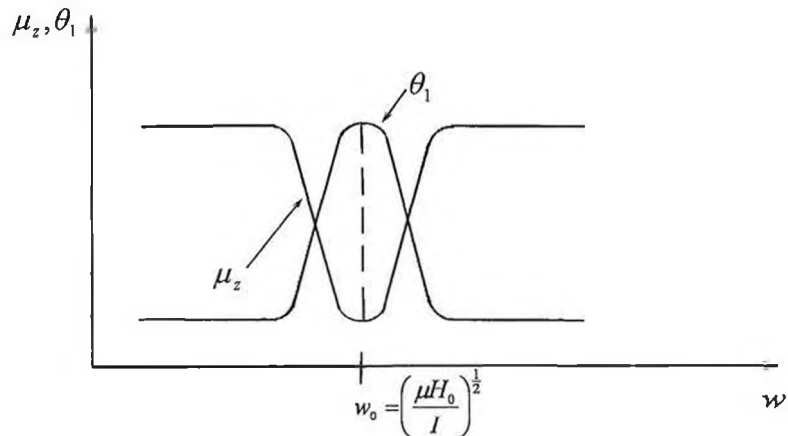


Рис. 4. Зависимость μ_z и θ_1 от частоты.

В общем случае нелинейное уравнение (1) решить невозможно. Однако можно найти ряд частных решений при резонансе с частотой $\omega = \frac{n}{m} \omega_0$, где n и m – целые числа и ω_0 сложным образом зависит от параметров системы $\omega_0 = f(\varepsilon_{-1}, \theta, \varepsilon_0, \dots)$. Для реальных ферромагнетиков уравнения движения для намагниченности очень сложны и решение их в

общем виде с учётом различных параметров (кристаллографической анизотропии, магнитоstriction и т.п.) практически невозможно. Поэтому в дальнейшем используется ряд упрощений.

1.2.2 Основы ФМР в образцах с анизотропией формы.

Резонансное поглощение магнитным кристаллом энергии электромагнитного поля (ферромагнитный резонанс) наблюдается при совпадении собственной частоты прецессии ω_0 и частоты внешнего возбуждающего поля ω . Собственная частота прецессии ω_0 зависит от формы образца, симметрии кристалла, типа магнитного упорядочения, магнитного состояния образца и от некоторых других факторов.

При выводе основных соотношений для восприимчивости и частоты исходят из динамического уравнения намагниченности $\vec{M}$ [19]:

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma \vec{M} \vec{H}_{эфф} + \frac{\alpha}{M} \cdot \frac{\vec{M} \partial \vec{M}}{\partial t} \quad (5)$$

где: $\vec{H}_{эфф}$ - эффективное магнитное поле внутри образца;

α - параметр затухания;

$\gamma = \frac{e}{2m_e c}$ - гиромагнитное отношение (для ферромагнетиков, парамагнетиков

$\frac{\gamma}{2\pi} \sim 2,8$ МГц/э), e - заряд электрона, m_e - масса электрона, c - скорость света.

Для изотропного намагниченного до насыщения образца эффективное поле:

$$\vec{H}_{эфф} = \vec{H}_0 + \vec{H}_D + \vec{h} \quad (6)$$

где: $\vec{H}_0$ - внешнее постоянное поле;

$\vec{H}_D$ - дипольное (размагничивающее) поле;

$\vec{h}$ - переменное поле.

Для эллипсоида однородное размагничивающее поле можно записать в виде:

$$\vec{H}_D = -\hat{N}\vec{M}$$

где: $\hat{N}$ - размагничивающий фактор (является тензором второго ранга).

$$\hat{N} = \begin{vmatrix} N_x & 0 & 0 \\ 0 & N_y & 0 \\ 0 & 0 & N_z \end{vmatrix}, \quad N_x + N_y + N_z = 1 \quad (7)$$

Пусть переменное магнитное поле $\vec{h}$ изменяется по гармоническому закону $h = h \cdot e^{i\omega t}$. Тогда $\vec{H}_{эфф}$ можно представить в виде:

$$\vec{H}_{эфф} = (\vec{H}_0 - 4\pi\hat{N}\vec{M}_0) + (\vec{h} - 4\pi\hat{N}\vec{m}) \cdot e^{i\omega t}, \quad (8)$$

где: $\vec{m} = \hat{\chi} \cdot \vec{h}$, $\hat{\chi}$ - тензор восприимчивости.

Намагниченность состоит из постоянной $\vec{M}_0$ и переменной $\vec{m}$ составляющих:

$$\vec{M} = \vec{M}_0 + \vec{m} \cdot e^{i\omega t} \quad (9)$$

Подставляя (9) и (8) в уравнение (5), получаем:

$$\begin{aligned} m_x &= \chi_{xx} h_x + i\chi_{xy} h_y, \quad m_z = 0 \\ m_y &= \chi_{yy} h_y - i\chi_{xy} h_x, \quad \vec{m} = \hat{\chi} \cdot \vec{h} \end{aligned} \quad (10)$$

Компоненты тензора восприимчивости $\hat{\chi}$ имеют вид:

$$\begin{aligned} \chi_{xx,yy} &= \chi_0 \frac{\omega_0 \cdot [\omega_H + (N_{y,x} - N_z) \cdot \omega_M + i\alpha\omega]}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\alpha\omega \cdot \left[\omega_H + (N_x + N_y - 2N_z) \cdot \frac{\omega_M}{2} \right]} \\ \chi_{x,y} &= \frac{\omega_0 \omega}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\alpha\omega \cdot \left[\omega_H + (N_x + N_y - 2N_z) \cdot \frac{\omega_M}{2} \right]} \end{aligned} \quad (11)$$

где: $\chi_0 = \frac{\gamma M_0}{\omega_0}$; $\omega_H = \gamma H_0$; $\omega_M = \gamma 4\pi M_0$;

Тогда формула для резонансной частоты будет иметь следующий вид:

$$\omega_0 = \gamma \cdot \left[(H_0 + 4\pi M_0 \cdot (N_x - N_z))(H_0 + 4\pi M_0 \cdot (N_y - N_z)) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

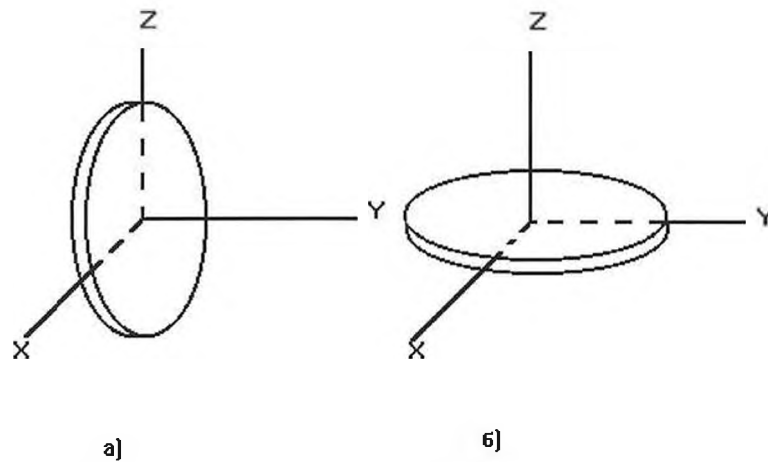


Рис. 5. Направление намагничения а) касательное, б) нормальное (линии напряжённости магнитного поля параллельны оси Z).

В таблице 1 приведены предельные случаи $\frac{\omega_0}{\gamma}$ (формулы Киттеля) [3 с. 890].

Таблица 1.

Образец	Направление намагничения	Рис.5	Размагничивающие факторы			$\frac{\omega_0}{\gamma}$
			N_x	N_y	N_z	
Диск	Касательное, //	А	0	1	0	$[H_0(H_0 + 4\pi M_0)]^{\frac{1}{2}}$
	Нормальное, $\perp$	Б	0	0	1	$H_0 - 4\pi M_0$

На рис. 6. приведена блок-схема экспериментальной установки:

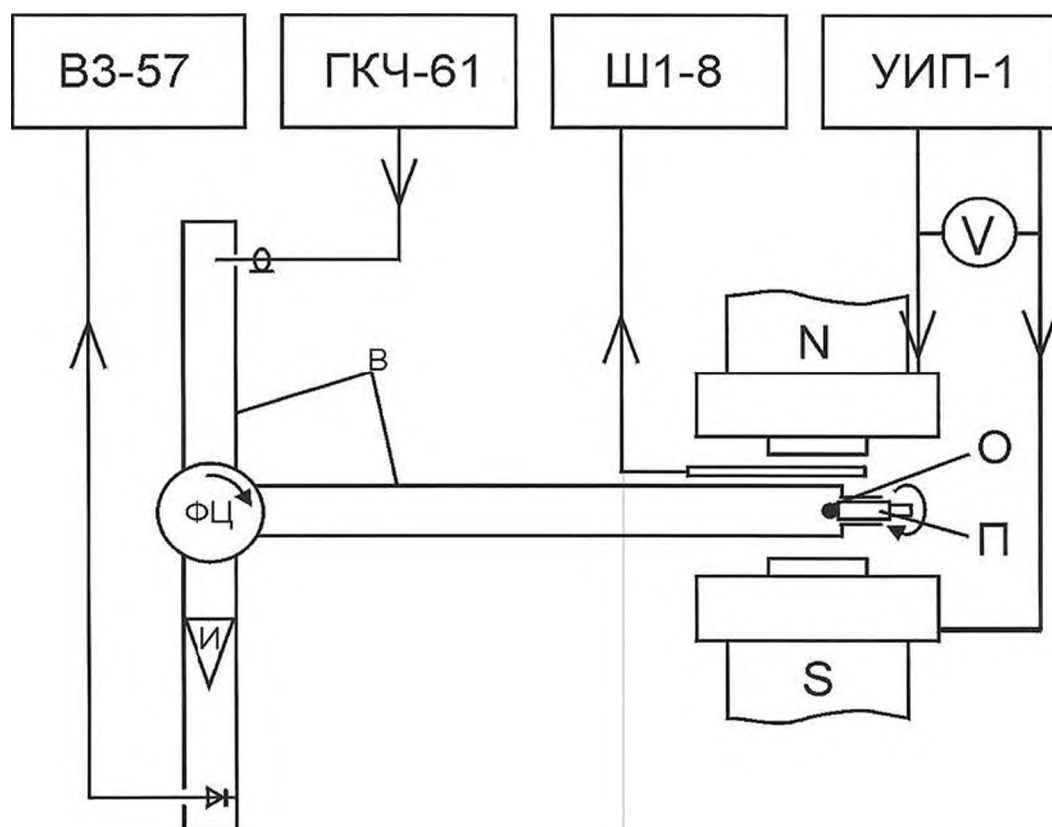


Рис. 6. Схема установки. Где: ВЗ-57 – милливольтметр; ГКЧ-61 – генератор качающейся частоты; Ш1-8 – магнитометр; УИП – универсальный источник питания; N и S – полюса электромагнита ЭМ-1; В – волноводы; О – ферритовый образец; ФЦ – ферритовый циркулятор; И – изолятор; V – вольтметр; П – поворотное устройство.

2. ПЛАН ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

2.1. Градуировка электромагнита.

1. Для проведения градуировки электромагнита необходимы приборы: Ш1-8 (магнитометр), УИП-1 (универсальный источник питания), вольтметр, электромагнит, которые подключаются соответственно схеме на рис.6. Включение приборов и работа с ними производится в соответствии с приложением по порядку работы с приборами.
2. Обмотки 1-3 электромагнита ещё **ДО** включения приборов должны быть подключены к клеммам УИПа, с диапазоном напряжения **20-600 V**. Параллельно к тем же обмоткам электромагнита подключается вольтметр для более точного измерения напряжения. **ПЕРЕД ВКЛЮЧЕНИЕМ ПИТАНИЯ НЕОБХОДИМО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ ПОДДИАПАЗОНОВ ОТ 20 ДО 600 V ПОСТАВИТЬ В ПОЛОЖЕНИЕ ОТ 20 ДО 150 V, РУЧКУ ПЛАВНОЙ РЕГУЛИРОВКИ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ - В КРАЙНЕЕ ЛЕВОЕ ПОЛОЖЕНИЕ, А ТУМБЛЕР АНОД В НИЖНЕЕ ПОЛОЖЕНИЕ.**
3. Для проведения измерений, датчик Холла помещается в специальный держатель таким образом, чтобы чувствительный элемент датчика, обозначенный на щупе символом О, располагался симметрично относительно торцов сердечников, а сам датчик был расположен вертикально. Расстояние между сердечниками устанавливается равным высоте волновода.

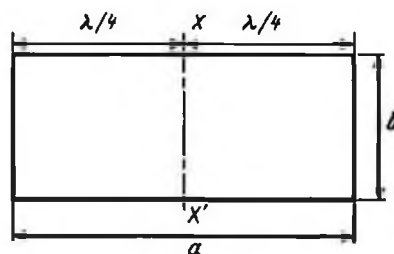


Рис. 7. Поперечное сечение волновода. Где ε – ширина, b – высота волновода соответственно.

4. Градуировка заключается в построении градуировочной таблицы, в которой фиксируется напряжение U (по показаниям вольтметра), подаваемое в данный момент на электромагнит и соответствующую ему индукцию магнитного поля фиксируемое магнитометром.

Градуировочная таблица.					
L, см	0,0	0,5	...	3,0	3,5
U, В	В, Тл	В, Тл	В, Тл	В, Тл	В, Тл
100					
110					
...					
190					
200					

где: L – расстояние от датчика магнитометра до оси сердечников. Которое определяется по рискам на градуировочном стержне (расстояние между рисками 0,5 см), совмещение плоскости регулировочного винта в держателе с первой риской соответствует нулевому значению.

2.2. Построение резонансной кривой.

1. При построении резонансной кривой требуются следующие приборы: ГКЧ-61 (СВЧ генератор), ВЗ-57 (микровольтметр), УИП-1 (универсальный источник питания), вольтметр, электромагнит ЭМ-1, которые подключаются соответственно схеме на рис.6. Включение приборов и работа с ними производится в соответствии с приложением по работе с приборами.
2. При помощи лаборанта закрепить в электромагните свободную часть волновода, в которую помещается ферритовый образец, таким образом, чтобы держатель образца свободно входил в него.
3. При помощи держателя поместить ферритовый образец в волновод и ориентировать его таким образом, чтобы метка на ручке держателя совпала с символом В на шкале держателя, что соответствует касательному намагничению и символом С при нормальном, соответственно.
4. На генераторе ГКЧ-61 переключатель АМ (амплитудная модуляция) перевести в положение ВНУТР. Установить режим ручного качания частоты [см. приложение]. Вращая ручку РУЧ. Установить частоту, заданную преподавателем. Установить тумблер СВЧ в верхнее положение (включено). При помощи ручки УРОВЕНЬ добиться, чтобы показания микровольтметра ВЗ-57 были равны 0,1 мВ.
5. Увеличивая напряжение с помощью ручки плавной регулировки на УИПе найти резонансное значение U_0 (фиксируемое вольтметром), которому будет соответствовать минимальное показание $U_{\min}$ микровольтметра (ВЗ-57). При этом показания дополнительного вольтметра и милливольтметра заносятся в таблицу 2:

Таблица 2.

N	1	2					
U, В							
$U_{\parallel}, \text{mB} \times 10^{-2}$	10	9	...	$U_{\min}$	...	9	10
$U_{\perp}, \text{mB}$							

где: N – число фиксируемых точек необходимых для построения резонансной кривой, $U_{\perp, \parallel}$ – напряжение, снимаемое милливольтметром (индексы $\perp$ и $\parallel$ обозначают случай нормального и касательного намагничения соответственно), U – напряжение, подаваемое на электромагнит (фиксируемое вольтметром).

6. На основе таблицы 2, с использованием градуировочной таблицы, построить графики зависимости $U_{\perp, \parallel}(H)$. Где напряженность магнитного поля H определяется из соотношения $1 \text{ Тл} = 10000 \text{ э}$.
7. Пользуясь формулами Киттеля (таблица 1) составить систему уравнений и вычислить M и γ , по найденным резонансным значениям $H_{\parallel}$, $H_{\perp}$ и ω_0 .
8. Оценить погрешность измерений.

Дополнительные вопросы.

1. Чем объясняется столь характерный вид петли гистерезиса (рис.2)?
2. Что такое магнитоstriction?
3. Почему при работе с СВЧ техникой преимущественно используются волноводы, а не провода и коаксиальные кабели?
4. Что такое аттенюатор мощности?
5. Физический смысл ФМР?
6. Что собой представляет и какие функции выполняет ферритовый циркулятор?
7. На чём основан принцип работы магнитометра?
8. Написать систему уравнений Максвелла для ЭМ поля в отсутствии свободных зарядов и токов?
9. Что, исходя из уравнений Максвелла, представляет собой ЭМ волна?
10. Как возникает ЭМ волна?

ЛИТЕРАТУРА.

1. Яковлев Ю.М. Генделев С.Ш. Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике. М., Сов. радио. 1975. 360 с.
2. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М., "Наука". 1973. 592 с.
3. Вонсовский С.В. Магнетизм. М., Наука, 1971. 1032 с.
4. Киселев Б.И. Метод адаптивного лечения. С-П., Комплекс. 1997. 9 с.(МИС-РТ. сб. №17-4. 2000. <http://web.uni.udm.ru/common/biomed/akdmed.htm>).
5. Киселев Б.И. Способ обработки физиологического раствора Киселева Б.И. а.с. № 1827274, кл. А61 № 5/06 от 13.10.1992.
6. Давид Р. Введение в биофизику. М., Мир. 1982. 207 с.
7. Советский Энциклопедический Словарь. М., Советская энциклопедия. 1990. 1632 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ ПО РАБОТЕ С ПРИБОРАМИ

1. Измеритель магнитной индукции (Ш1-8).
2. Универсальный источник питания (УИП-1).
3. Генератор сигналов высокочастотный (ГКЧ-61).
4. Микровольтметр (ВЗ-57).

1. Порядок работы с измерителем магнитной индукции Ш1-8.

1.1. Подготовка прибора к проведению измерений.

Установить тумблер СЕТЬ в положение ВКЛ., при этом должна загореться сигнальная лампочка. Прогреть прибор в течение 15 минут.

Шкалу первой декады отсчётного устройства ОТСЧЁТ ИНДУКЦИИ, Т установить в положение ">0<". Тумблер ПОЛЯРНОСТЬ установить в положение "N". Тумблер ИНДИКАТОР установить в положение ТОЧНО. Зонд расположить таким образом, чтобы преобразователь Холла был максимально удалён от источников магнитного поля. Резисторами УСТ. НУЛЯ - ГРУБО, ТОЧНО совместить стрелку индикатора с отметкой "0". Поместить зонд в магнитное поле, при этом стрелка индикатора должна отклониться влево. Если стрелка индикатора отклониться вправо, зонд "М" следует повернуть на 180°.

1.2. Проведение измерений.

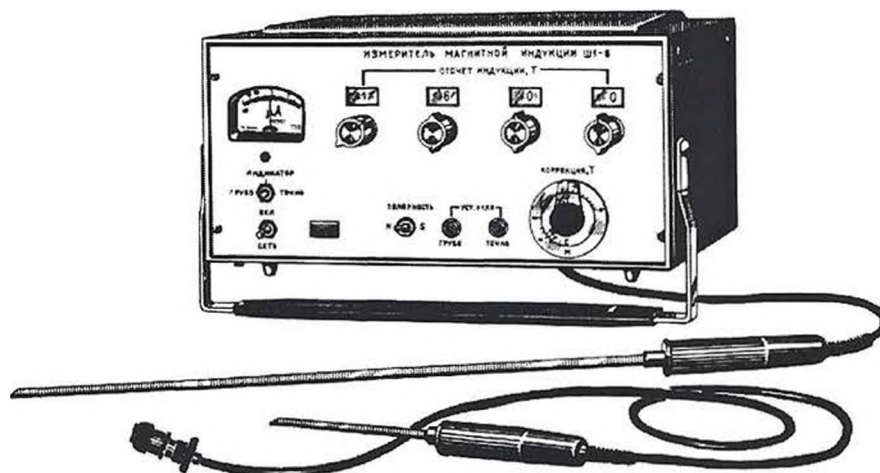


Рис. 1. Внешний вид магнитометра Ш1-8.

Установить тумблер ИНДИКАТОР в положение ГРУБО, шкалу первой декады отсчётного устройства ОТСЧЁТ ИНДУКЦИИ, Т перевести в положение "0.0", либо в положение "0. ", в зависимости от величины измеряемого поля. Ручку КОРРЕКЦИЯ, Т поставить в крайнее левое положение. Поместить зонд в магнитное поле. Головку зонда необходимо поместить в магнитное поле таким образом, чтобы плоскость головки зонда с отметкой "О" была перпендикулярна направлению вектора магнитного поля. При помощи ручек ОТСЧЁТ ИНДУКЦИИ, Т добиться совмещения стрелки индикатора с нулём путём постепенного увеличения (уменьшения) показаний шкал отсчётного устройства. Далее установить тумблер ИНДИКАТОР в положение ТОЧНО и так же при помощи изменения показаний отсчётного устройства добиться совмещения стрелки индикатора с нулём. Затем снять показания по отсчётному устройству ОТСЧЁТ ИНДУКЦИИ, Т, после чего все тумблеры и ручки устанавливаются в исходное положение для проведения следующего шага измерений.

2. Порядок работы с источником питания УИП-1.

ПЕРЕД ВКЛЮЧЕНИЕМ ПРИБОРА НЕОБХОДИМО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ ПОДДИАПАЗОНОВ ОТ 20 ДО 600 ПОСТАВИТЬ В ПОЛОЖЕНИЕ ОТ 20 ДО 150, А РУЧКУ ПЛАВНОЙ РЕГУЛИРОВКИ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ - В КРАЙНЕЕ ЛЕВОЕ ПОЛОЖЕНИЕ.

Это будет соответствовать наименьшим выходным напряжениям. После этого прибор может быть включён, для чего тумблер СЕТЬ переводят в верхнее положение. При включении прибора должна загореться сигнальная лампочка. Прогреть прибор в течение 5 минут. Установка выходных стабилизированных напряжений производится по вольтметру с помощью переключателей поддиапазонов от 20 - 600 В и ручек плавной регулировки от 20 до 600 В.

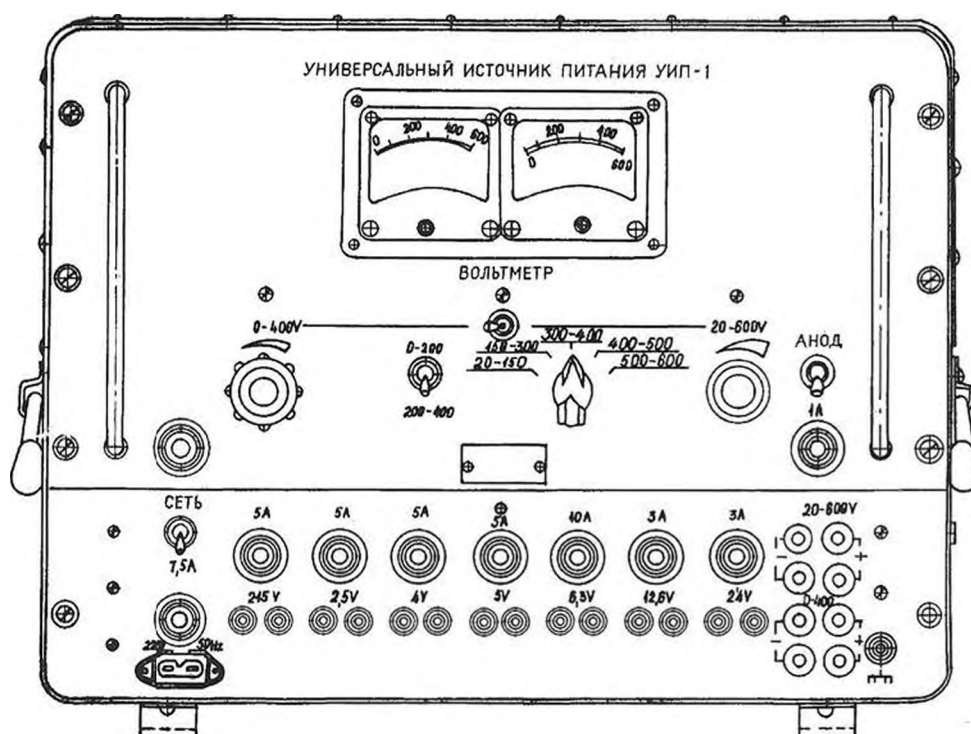


Рис. 2. Внешний вид УИП-1.

3. Порядок работы с генератором ГКЧ-61.

- 3.1. Проверьте заземление корпуса ГКЧ.
- 3.2. Установите тумблеры СЕТЬ и СВЧ в выключенное положение и подключите ГКЧ к сети с напряжением 220 В.
- 3.3. Включите тумблер СЕТЬ и прогрейте ГКЧ в течение 15 минут.
- 3.4. Для установки в ГКЧ режима ручного качания частоты выполните следующие операции:
 - а) переключатель ВР. ПЕРЕСТРОЙКИ установите в положение 0,08;
 - б) переключатель РЕЖИМ ПЕРЕСТРОЙКИ установите в положение F_1-F_2 ;
 - в) установите переключатель индикации в положение F_1 и ручкой F_1 , F_0 установите на отсчётном табло начальную частоту ползеты качания;

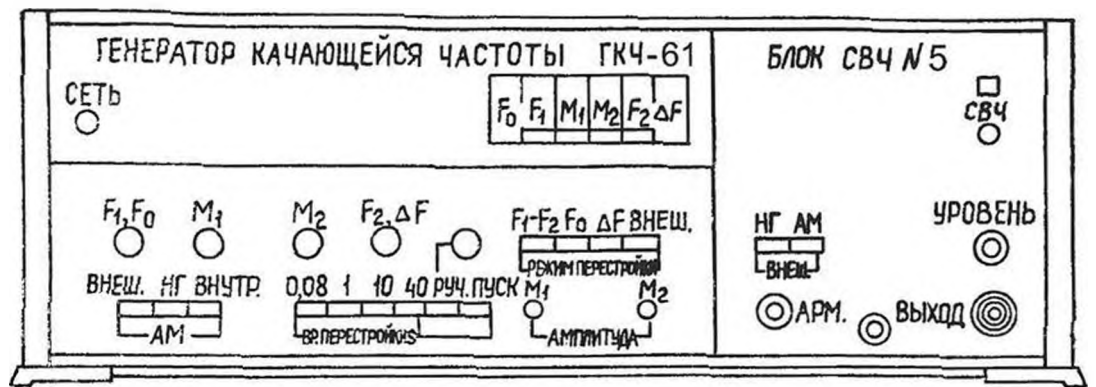


Рис. 3. Внешний вид ГКЧ-61.

- г) установите переключатель индикации в положение F_2 и ручкой $F_2, \Delta F$ установите на отсчётном табло конечную частоту полосы качания;
- д) переключатель ВР. ПЕРЕСТРОЙКИ установите в положение РУЧ. и, вращая ручку РУЧ. от упора до упора, перестраивайте частоту в установленной полосе качания, производя отсчёт по отсчётному табло при любом положении переключателя индикации.

4. Порядок работы с микровольтметром ВЗ-57.

- 4.1. Включить прибор в сеть. Прогреть в течение 5 минут.
- 4.2. Проверить механический нуль показывающего прибора и, при необходимости, установить его корректором, расположенным в центре передней панели.
- 4.3. Переключателем поддиапазонов установить нужный диапазон измерений.
- 4.4. Отсчет значений напряжения проводится по шкале прибора с учётом коэффициента поддиапазона. Если коэффициент кратен 3 то отсчет производится по нижней шкале прибора, иначе по верхней.



Рис. 4. Внешний вид ВЗ-57.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Технические характеристики приборов.

ГЕНЕРАТОРЫ КАЧАЮЩЕЙСЯ ЧАСТОТЫ ГКЧ-52, ГКЧ-60, ГКЧ-61.

В техническом описании приняты следующие сокращения и обозначения:

ГКЧ — генератор качающейся частоты;
РПЧ — ручная перестройка частоты;
АРМ — автоматическая регулировка мощности;
АМ — амплитудная модуляция;
НГ — непрерывная генерация;
УПТ — усилитель постоянного тока;
СВЧ — сверхвысокая частота;
ВЧ — высокочастотный;
КСВН — коэффициент стоячей волны по напряжению;
ЭЛТ — электронно-лучевая трубка.

1. НАЗНАЧЕНИЕ

Генераторы качающейся частоты 52, 60, 61 предназначены для использования в качестве источника СВЧ сигнала в составе панорамного измерителя КСВН типа Р2.



Рис. 1. Внешний вид генератора ГКЧ – 61.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

2.1. Диапазон рабочих частот ГКЧ, число рабочих поддиапазонов и граничные частоты рабочих поддиапазонов соответствуют значениям, указанным в таблице 1.

Таблица 1

Условное обозначение прибора	№№ блоков	Диапазон частот ГГц	Число поддиапазонов	Граничные частоты поддиапазонов (ГГц)
ГКЧ 52	1	1,07—2,14	—	—
ГКЧ 60	4,5	5,6—12,05	2	5,6—8,3; 8,15—12,05
ГКЧ 61	5	8,15—12,05	—	—

2.2. Максимальная полоса качания частоты не менее рабочего поддиапазона частот, минимальная полоса качания не более 1% от максимальной частоты рабочего поддиапазона.

- 2.3. Предел допускаемой основной погрешности определения частоты и граничных частот полосы качания ГКЧ не превышает $\pm 0,02 f_{\max}$, где $f_{\max}$ — значение максимальной частоты рабочего поддиапазона.
- 2.4. Кратковременная нестабильность частоты ГКЧ в режиме РПЧ за 5 мин и по истечении 5 мин после перестройки частоты в нормальных условиях не превышает $1 \cdot 10^{-3} f_{\max}$.
- 2.5. Ширина спектра выходного сигнала ГКЧ в режиме НГ и РПЧ с учетом паразитной девиации частоты на уровне минус 10 дБ от уровня основного сигнала не превышает $0,05 \Delta f_{\min}$, где $\Delta f_{\min}$ — минимальная полоса качания частоты.
- 2.6. ГКЧ обеспечивают следующие режимы перестройки частоты:
 - ручная перестройка частоты;
 - ручное качание частоты;
 - периодическое качание частоты;
 - разовое качание частоты с ручным запуском;
 - перестройка частоты от внешнего источника напряжения.
- 2.7. Длительность периодов автоматического качания частоты составляет 0,08; 1; 10 и 40 с.
- 2.8. Нелинейность перестройки частоты ГКЧ в максимальной полосе качания не превышает $\pm 5\%$ от максимального значения полосы качания.
- 2.9. Выходная мощность ГКЧ при работе их на согласованную нагрузку не менее 1 мВт.
- 2.10. Погрешность системы АРМ относительно частотной характеристики внешнего датчика не превышает $\pm 0,3$ дБ.
- 2.11. Чувствительность системы АРМ по входу не хуже 5 мВ.
- 2.12. ГКЧ обеспечивают работу:
 - а) в режиме непрерывной генерации (НГ);
 - б) в режиме внутренней амплитудной модуляции (АМ) меандром с частотой (100 ± 1) кГц и глубиной модуляции не менее 15 дБ.
- 2.13. Высокочастотный выход ГКЧ коаксиальный с волновым сопротивлением 50 Ом и сечением 7/3,04 мм.

3. ПРИНЦИП РАБОТЫ СИСТЕМЫ АРМ

- 3.1. С выхода генератора СВЧ сигнал генератора поступает на вход модулятора. В одном корпусе модулятора размещены идентичные по устройству и последовательно соединенные конструктивной емкостью р-і-п — диодный модулятор и р-і-п — диодный аттенуатор. Подачей через р-і-п — диоды модулятора модулирующего тока от блока управления осуществляется амплитудная модуляция СВЧ сигнала.

Принцип действия р-і-п — диодного модулятора заключается в том, что во время воздействия тока на р-і-п — диоды, последние, отпираясь, шунтируют мощность СВЧ сигнала пропорционально величине протекающего тока, а при отсутствии тока р-і-п — диоды, запираясь, создают СВЧ тракте лишь незначительное начальное ослабление СВЧ сигнала.

- 3.2. В блоке СВЧ предусмотрена внешняя система АРМ.

Сигнал от внешнего датчика АРМ, пропорциональный уровню выходной мощности генератора, через потенциометр УРОВЕНЬ поступает на вход усилителя АРМ.

В усилителе АРМ предварительно усиленный и продетектированный (в режиме АМ) сигнал датчика АРМ сравнивается с установленной величиной опорного напряжения, запирающего выходной каскад усилителя АРМ.

Если на вход усилителя АРМ с потенциометра УРОВЕНЬ сигнал датчика АРМ не поступает или поступает малой величины, которая в цепи сравнения не превышает уровень опорного напряжения, то выходной каскад усилителя АРМ остается заперт,

ток через р-і-п — диоды attenuатора отсутствует, attenuатор не вносит ослабления СВЧ сигнала и амплитудно-частотная характеристика сигнала датчика АРМ в полосе качания частоты выглядит так, как показано на рис. 2,а.

Если потенциометром УРОВЕНЬ установить на входе усилителя АРМ сигнал с датчика АРМ такой величины, который после предварительного усиления превысит в цепи сравнения уровень опорного напряжения, то выходной каскад усилителя АРМ частично отопрется, через р-і-п — диоды attenuатора потечет некоторый ток, что внесет ослабление СВЧ сигнала с более высоким уровнем в отдельных частях полосы качания, как показано на рис. 2,б.

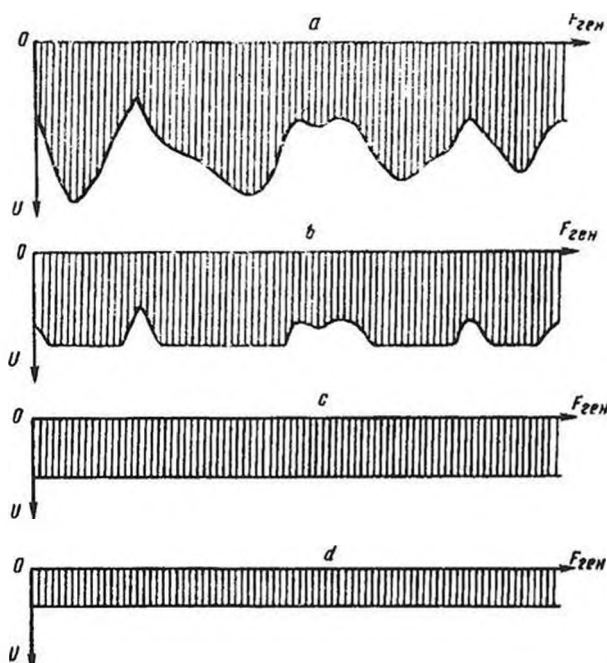


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика сигнала датчика АРМ в полосе качания частоты и действие системы АРМ.

Если увеличить с помощью потенциометра УРОВЕНЬ сигнал датчика АРМ настолько, чтобы даже в точках наименьшего уровня мощности сигнал в цепи сравнения усилителя АРМ превысил бы уровень опорного напряжения, то получим полную стабилизацию уровня выходной мощности генератора во всей полосе качания по минимальному уровню, как показано на рис. 2,с.

При дальнейшем увеличении с помощью потенциометра УРОВЕНЬ сигнала датчика АРМ получим большой ток через р-і-п — диоды с выхода усилителя АРМ и большее общее уменьшение стабилизированного уровня мощности во всей полосе качания, как показано на рис. 2,д.

Таким образом, замкнутая цепь системы АРМ, состоящая из р-і-п — диодного attenuатора, внешнего датчика АРМ, переключателя АРМ, потенциометра УРОВЕНЬ и усилителя АРМ, благодаря действию отрицательной обратной связи обеспечивает СВЧ тракту регулируемый постоянный уровень мощности во всем диапазоне частот генератора.

При внешней системе АРМ внешний датчик сигнала АРМ подключается к разъему ВЫХОД ГКЧ.

Сигнал датчика подается на вход усилителя АРМ через разъем АРМ и переключатель АРМ, установленный в положение ВНЕШ. НГ или АМ.

ИЗМЕРИТЕЛЬ КСВН ПАНОРАМНЫЙ Р2-78

1. НАЗНАЧЕНИЕ

- 1.1. Измеритель коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) панорамный Р2-78 (далее "измеритель") предназначен для панорамного отображения в линейном и логарифмическом режимах на экране индикаторного устройства и измерения частотных характеристик КСВН и коэффициента передачи элементов коаксиального волновода каналов 3,5/1,52 мм, 7/3,04 мм, 16/6,95 мм в диапазоне частот от 1,25 до 5,0 ГГц и канала 16/4,6 мм в диапазоне частот от 1,25 до 3,0 ГГц. Измеритель может работать на малом ($<1 \cdot 10^{-5}$ Вт) и среднем (от $1 \cdot 10^{-5}$ до $0,5 \cdot 10^{-3}$ Вт) уровнях зондирующей мощности в тракте.
- 1.2. Измеритель может применяться в лабораторных и цеховых условиях, а также в ремонтных и поверочных органах.

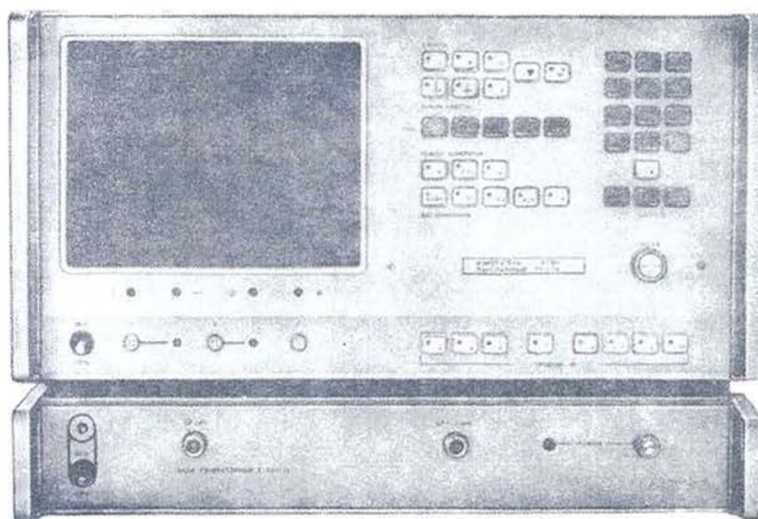


Рис. 3. Внешний вид измерителя Р2-78.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

- 2.1. Рабочий диапазон частот измерителя 1,25 – 5,0 ГГц.
- 2.2. Измеритель обеспечивает полосу качания:
- 1) максимальную не менее 3750 МГц;
 - 2) минимальную не более 50 МГц.
- 2.3. Измеритель обеспечивает цифровой отсчет частоты с пределами допускаемой погрешности не более $\pm 0,2\%$.
- 2.4. Диапазон измерения КСВН соответствует значениям, приведенным в табл. 1. Диапазон индикации КСВН от 1 до ∞ .
- 2.5. Пределы допускаемой погрешности измерения КСВН для $K_{с\tau u} \leq 2$ в рабочем диапазоне частот не более значений, определяемых по выражениям, приведенным в табл. 1. Пределы допускаемой погрешности измерения КСВН для $K_{с\tau u}$ от 2 до 5 в рабочем диапазоне частот не более значений, определяемых по выражениям, приведенным в табл. 1.
- 2.6. Диапазон измерения коэффициента передачи на среднем уровне зондирующей

мощности (до $0,5 \cdot 10^{-3}$ Вт) от минус 50 до плюс 30 дБ. Диапазон измерения коэффициента передачи на малом уровне зондирующей мощности ($< 1 \cdot 10^{-5}$ Вт) от минус 30 до плюс 30 дБ.

2.7. Пределы допускаемой погрешности измерения ослабления согласованных четырёхполюсников ($K_{сгУ} \leq 1,2$) при среднем и малом уровнях зондирующей мощности в рабочем диапазоне частот в децибелах не более значений, определяемых по формулам (1 и 2) соответственно:

$$\delta A = \pm(0,03 A_x + 0,2); \quad (1)$$

$$\delta A = \pm(0,05 A_x + 0,2), \quad (2)$$

где A_x - значение измеряемого ослабления, дБ.

Таблица 1.

Измерительный канал	Рабочий диапазон	Диапазон измерения	Пределы допускаемой погрешности измерения КСВН ($\delta K_{сгУ}$), %, не более.	
			Для $K_{сгУ} \leq 2$	Для $K_{сгУ}$ от 2 до 5
3,5/1,52	1,25 – 5,0	1,07 – 5,0	$\pm 5 K_{сгУ}$	$\pm \frac{5K_{сгУ}}{100 - (\pm 5K_{сгУ}) \frac{K_{сгУ}}{K_{сгУ} + 1}} \cdot 100$
7/3,04	1,25 – 5,0	1,04 – 5,0	$\pm(3 K_{сгУ} + 1)$	$\pm \frac{K_{сгУ} + 1}{100 - [\pm(3K_{сгУ} + 1)] \frac{K_{сгУ}}{K_{сгУ} + 1}} \cdot 100$
16/4,6	1,25 – 5,0	1,04 – 5,0	$\pm(3 K_{сгУ} + 1)$	$\pm \frac{3K_{сгУ} + 1}{100 - [\pm(3K_{сгУ} + 1)] \frac{K_{сгУ}}{K_{сгУ} + 1}} \cdot 100$
16/4,6	2,0 – 3,0	1,1 – 5,0	$\pm(5 K_{сгУ} + 5)$	$\pm \frac{5K_{сгУ} + 1}{100 - [\pm(5K_{сгУ} + 5)] \frac{K_{сгУ}}{K_{сгУ} + 1}} \cdot 100$
16/6,95	1,25 – 5,0	1,04 – 5,0	$\pm(3 K_{сгУ} + 1)$	$\pm \frac{3K_{сгУ} + 1}{100 - [\pm(3K_{сгУ} + 1)] \frac{K_{сгУ}}{K_{сгУ} + 1}} \cdot 100$

2.8. Измеритель обеспечивает панорамное измерение зондирующей мощности в пределах от $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-7}$ Вт (от минус 3 до минус 33 дБм, дБм - уровень мощности относительно значения 1 мВт). Пределы допускаемой погрешности измерения мощности не более ± 2 дБ.

2.9. КСВН пары переходов или аттенюаторов-переходов, входящих в комплект измерителей, не превышает 1,2 в рабочем диапазоне частот измерителей.

ИНДИКАТОР КСВН И ОСЛАБЛЕНИЯ Я2Р-67

1. НАЗНАЧЕНИЕ

- 1.1. Индикатор КСВН и ослабления Я2Р-67 предназначен для использования в составе панорамных измерителей КСВН и ослабления.
- 1.2. Индикатор (в составе приборов) может применяться в лабораторных и цеховых условиях, а также в ремонтных мастерских и поверочных органах.



Рис. 4. Внешний вид индикатора Я2Р-67.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

- 2.1. Рабочая частота измеряемого сигнала (100 ± 1) кГц. Уход уровня калибровки при изменении частоты в пределах (100 ± 1) кГц не более $\pm 0,05$ дБ.
- 2.2. Пределы измерения ослабления от 0 до минус 35 дБ, пределы измерения КСВН - от 1,035 до 5. Пределы индикации ослабления - от 0 до минус 40 дБ. Пределы индикации КСВН - от 1,02 до ∞ .
- 2.3. Погрешность измерения ослабления в линейном масштабе в децибелах не более величин, определяемых по формулам:

$$\delta A = \pm (0,01[A_x] + 0,2), \text{ до } 20 \text{ дБ}, \quad (1)$$

$$\text{и } \delta A = \pm (0,015[A_x] + 0,2) \text{ свыше } 20 \text{ дБ}, \quad (2)$$

где A_x - измеряемое ослабление, дБ.

- 2.4. Несоответствие шкал КСВН линейной шкале дБ не более $\pm 0,05$ дБ в пределах, соответствующих рабочему участку шкалы дБ от минус 5 до плюс 2 дБ.
- 2.5. Погрешность измерения ослабления в логарифмическом масштабе в пределах шкалы от 0 до минус 30 дБ в децибелах не превышает величины, определяемой по формуле
$$\delta A = \pm (0,1 |A_x| + 1,0) \quad (3)$$
- 2.6. Диапазон входных напряжений канала падающей волны $(0,03 - 10)$ мВ. При этом уровень напряжения в канале отраженной волны должен быть не менее 1 мкВ. Уход показаний индикатора при изменении уровня входного сигнала во всем диапазоне входных напряжений канала падающей волны не более $\pm 0,2$ дБ, а в положении переключателя ПРЕДЕЛЫ 30 не более $\pm 0,3$ дБ.
- 2.7. Входное сопротивление усилителей каналов падающей и отраженной волн на частоте 100 кГц $(2,7 \pm 0,75)$ кОм. Сопротивление входа горизонтальной развертки постоянному току $(4,7 \pm 1,2)$ кОм.
- 2.8. Погрешность измерения напряжения канала падающей волны в пределах от 0,4 до 10,0

мВ не более 15%.

- 2.9. Ручкой КАЛИБР обеспечиваются пределы регулировки усиления канала отраженной волны не менее 5 дБ.
- 2.10. Усиление напряжения падающей волны для системы АРМ не менее 15 раз.
- 2.11. Постоянное напряжение на контакте Б2 разъема САМОПИСЕЦ не менее 0,5 В.
- 2.12. Кнопкой $-10dB$ усиление канала падающей волны уменьшается на (10 ± 1) дБ.
- 2.13. Амплитуда метки на экране ЭЛТ не менее 10 мм при напряжении на входе усилителя метки 0,3 В.
- 2.14. Чувствительность усилителя напряжения горизонтальной развертки не менее 4 см/В.
- 2.15. Чувствительность канала для гашения обратного хода развертки не менее 1,9 см/В.
- 2.16. Система компенсации неидентичности каналов СВЧ тракта обеспечивает формирование четырех отдельно регулируемых напряжений.
Пределы регулировки по амплитуде относительно уровня калибровки не менее ± 1 дБ, по положению - в пределах рабочего участка экрана ЭЛТ и по ширине - изменение ширины компенсирующего сигнала не менее чем в 2 раза на уровне 0,5 при подаче на вход корректора пилообразного напряжения с размахом от 0 до минус 5 В и частотой повторения (12 ± 3) Гц.
- 2.17. На открытых входах ПАД ОТРАЖ должно быть двухполярное напряжение, регулируемое в пределах от 0 до 0,9 В.
- 2.18. Уход калибровки индикатора при изменении температуры окружающей среды не превышает $\pm 0,15$ дБ на каждые 10 К (10°C) в рабочем диапазоне температур.
- 2.19. Уход калибровки индикатора после прогрева за 2 ч работы в нормальных условиях не превышает $\pm 0,05$ дБ.

БЛОК ИНДИКАТОРНЫЙ Я2Р-70

1. НАЗНАЧЕНИЕ

- 1.1. Блок индикаторный Я2Р-70 предназначен для использования в составе панорамных измерителей КСВН и ослабления элементов коаксиальных и прямоугольных волноводов.
- 1.2. Прибор предназначен для работы в лабораторных и цеховых условиях, а также в ремонтных мастерских и поверочных органах.

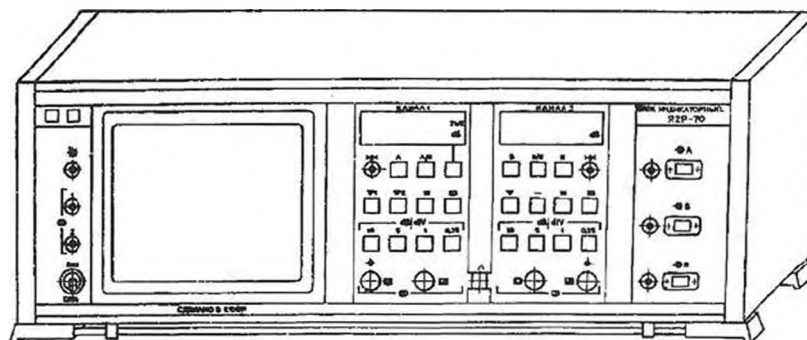


Рис. 5. Внешний вид блока Я2Р-70.

2.ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

- 2.1. Рабочая частота информационных (А и В) и опорного (R) сигналов $(100 \pm 0,06)$ кГц.
- 2.2. Рабочий диапазон уровней сигналов от минус 50 до 0 дБ для сигналов А и В и от минус 35 до 0 дБ для сигнала R.
- Примечание. Уровням сигналов $(0 \pm 0,4)$ дБ, связанным с их напряжением логарифмической зависимостью $10 \lg(U/U_M)$ соответствует максимальное напряжение сигналов $U=U_M=100$ мВ (эффективное значение первой гармоники).
- 2.3. Прибор обеспечивает панорамную индикацию и цифровое измерение относительных изменений уровней сигналов (в дальнейшем - отношений при работе в режимах непосредственного анализа сигналов А, В и R (режимы А, В и R) и анализа отношений сигналов А/R и В/R (режимы А/R и В/R)).
- 2.4. Пределы цифрового измерения отношений в режимах А, А/R. В и В/R:
- 1) от минус 50 до 0 дБ (в том числе от 1,006 до 5 единиц КСВН в режимах А и А/R) при начальных уровнях сигналов А и В 0 дБ;
 - 2) от 0 до 30 дБ при начальных уровнях сигналов А и В минус 30 дБ.
- Примечание. При начальных уровнях сигналов А и В минус 15 дБ нижние значения пределов измерения по подпункту 1 минус 35 дБ и 1,036 единиц КСВН.
- 2.5. Пределы цифрового измерения отношений в режиме R относительно уровня сигнала 0 дБ от минус 35 до 0 дБ.
- 2.6. Основная погрешность цифрового измерения отношений, включая погрешность из-за дискретности показаний, не более пределов допускаемого значения основной погрешности, установленных:
- 1) для отношений, измеряемых в децибелах - графиком на рис.2;
 - 2) для отношений, измеряемых в единицах КСВН, формулами $\pm 1,5$ К% при К от 1,006 до 1,923 и $\pm (K+1)\%$ при К более 1,923, где К - численное значение отношений, измеряемых в единицах КСВН.
- 2.7. Погрешность цифрового измерения отношений в интервале рабочих значений температуры окружающей среды от 5 до 40°C не более полуторократной величины пределов допускаемой основной погрешности.
- 2.8. Пределы панорамной индикации отношений от минус 50 до 30 дБ при переключаемом масштабе 10,5,1 и 0,25 дБ на одно большое деление шкалы панорамного индикатора. Шкала панорамного индикатора должна обеспечивать индикацию отношений в единицах КСВН от 1 до ∞ . Погрешность установки масштаба панорамной индикации не более $\pm 20\%$,
- 2.9. Пределы ручной установки вспомогательной визирной линии для панорамного анализа отношений в режимах А и А/R от минус 50 до 30 дБ.
- 2.10. Прибор обеспечивает нормализацию начальных уровней измерений и начальных условий панорамной индикации в режимах А, В, А/R и В/R. Пределы нормализуемых начальных условий от минус 50 до 30 дБ.
- 2.11. Прибор обеспечивает калибровку по среднему значению "короткое замыкание - холостой ход" в режимах А и А/R. Пределы калибровки ± 5 дБ в диапазоне средних значений условий калибровки от минус 25 до 25 дБ. Остаточная погрешность калибровки не более значений, установленных графиком на рис. 6. для отношений, численно равных средним значениям условий калибровки.
- 2.12. Прибор обеспечивает одновременную панорамную индикацию текущих и ранее введенных в его память частотных характеристик.
- 2.13. Пределы коррекции неквадратичности детекторных головок не менее, чем от минус 5 до 0 дБ.

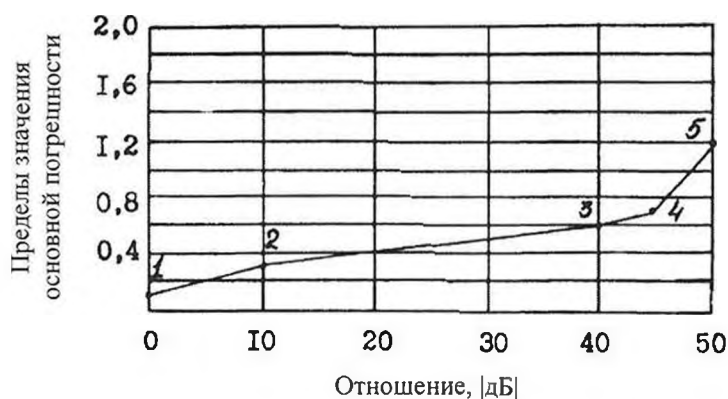


Рис. 6. Пределы допускаемого значения основной погрешности измерения соотношений, выраженных в децибелах

Координаты узловых точек:

- 1 - 0 дБ. $\pm 0,06$ дБ
- 2 - 10 дБ. $\pm 0,3$ дБ
- 3 - 40 дБ. $\pm 0,6$ дБ
- 4 - 45 дБ. $\pm 0,7$ дБ
- 5 - 50 дБ. $\pm 1,2$ дБ

- 2.14. Пределы плавной регулировки постоянного тока смещения для подпитки детекторных головок не менее, чем от 0 до ± 100 мкА.
- 2.15. Напряжение сигналов для линейной регулировки мощности по сигналу R и для функциональной регулировки мощности по сигналу A при уровне этих сигналов 0 дБ соответственно $(1,5 \pm 0,1)$ В на выходе АРМ и (5 ± 2) В на выходе РМ (регулировка мощности).
- 2.16. Уровень собственных шумов в режимах А и В при закороченных сигнальных входах не более минус 55 дБ.
- 2.17. Входное сопротивление прибора $(2,7 \pm 0,75)$ кОм.
- 2.18. Прибор обеспечивает вывод результатов измерения на одно и двухкоординатные регистрирующие устройства (самописцы). Вывод данных на однокоординатные регистрирующие устройства обеспечивается через разъём ИНТЕРФЕЙС КОП в масштабе (100 ± 5) мВ/дБ. Вывод данных на двухкоординатные регистрирующие устройства обеспечивается через разъём САМОПИСЕЦ за время (40 ± 12) с в масштабе по осям X и Y $(1 \pm 0,2)$ В на одно большое деление шкалы панорамного индикатора. Уровень сигнала "Перо" в режиме записи соответствует логическому нулю ТТЛ логики.

БЛОК ГЕНЕРАТОРА КАЧАЮЩЕЙСЯ ЧАСТОТЫ Я2Р-75

1. НАЗНАЧЕНИЕ

- 1.1. Блок ГКЧ Я2Р-75 предназначен для использования в качестве источника СВЧ сигнала в составе панорамных измерительных приборов.
- 1.2. Прибор предназначен для работы в лабораторных и цеховых условиях, а также в ремонтных мастерских и поверочных органах.



Рис. 7. Внешний вид генератора ГКЧ – 75.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

- 2.1. Диапазон рабочих частот ГКЧ не уже 2 – 8,30 ГГц.
- 2.2. Максимальная полоса качания частоты не менее рабочего диапазона частот, минимальная полоса качания не более 0,5 от максимальной частоты рабочего диапазона частот.
- 2.3. Пределы допускаемого значения погрешности отсчета и установки частоты не более $\pm 0,5\%$ от текущей частоты.
- 2.4. В приборе обеспечиваются следующие режимы перестройки и установки частоты;
 - 1) периодический с периодом перестройки 0,08 и 1 с;
 - 2) однократный с периодом перестройки 10 с;
 - 3) ручной (РПЧ);
 - 4) с наборного поля (F_0);
 - 5) ручного качания частоты.
- 2.5. Нестабильность частоты в режиме F_0 за 15-минутный интервал времени по стечению 15 минут после перестройки частоты не более $2,5 \cdot 10^{-4}$.
- 2.6. Ширина спектра в режиме F_0 на уровне минус 10 дБ от амплитуды сигнала несущей частоты не превышает 1 МГц.
- 2.7. Выходная мощность в режиме НГ при работе на согласованную нагрузку не менее 7 мВт.
- 2.8. Уровень стабилизированной в полном рабочем диапазоне частот выходной мощности на согласованную нагрузку в режиме НГ АРМ, при работе от внутреннего преобразователя сигнала ошибки, не менее (среднее значение) 6 мВт; с неравномерностью относительно среднего значения не более $\pm 1,2$ дБ. Регулировка уровня стабилизированной выходной мощности ГКЧ не менее 15 дБ относительно максимального стабилизированного уровня.
- 2.9. Погрешность системы АРМ относительно частотной характеристики внешнего преобразователя сигнала ошибки не более $\pm 0,45$ дБ.
- 2.10. КСВН выхода в режиме АРМ от собственного преобразователя сигнала ошибки не более 1,6.
- 2.11. В ГКЧ обеспечиваются следующие режимы работы;
 - 1) непрерывная генерация;
 - 2) внутренняя амплитудная модуляция меандром частотой 100 кГц;
 - 3) внешняя частотная модуляция сигналами частотой 0,1-250 кГц.
 Глубина внутренней амплитудной модуляции не менее 15 дБ.
- 2.12. Остаточная ЧМ в режиме F_0 на выходе ГКЧ не превышает 1 МГц.
- 2.13. Уровень гармонических составляющих на выходе ГКЧ не более минус 36 дБ в диапазоне частот 2,0-8,3 ГГц.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛАТЫ L152.

Плата выполнена в стандарте IBM PC XT/AT и устанавливается в любой из свободных разъемов расположенных непосредственно в компьютере. Подключение к внешним устройствам осуществляется через разъем платы со стороны задней панели компьютера. L152 представляет собой функционально полный комплекс, включающий в себя многоканальный, 12-и разрядный аналого-цифровой преобразователь с программируемым входным диапазоном сигнала по каждому каналу и частотой преобразования 150 kHz на один канал, 12-и разрядный цифро-аналоговый преобразователь со временем установления 20 мкс и выходным диапазоном сигнала от -5.12 V до +5.12 V , 8 TTL входов, 8 стробируемых TTL выходов. Аналого-цифровой преобразователь работает в двух режимах подключения источника внешнего сигнала:

1. 16 дифференциальных каналов.
2. 32 каналов относительно общей земли.

Генерация прерываний, внутренняя синхронизация и работа в режиме реального времени обеспечивается тремя 16-м разрядными таймерами с опорной кварцевой частотой 1MHz.

ПРИБОР САМОПИШУЩИЙ ДВУХКООРДИНАТНЫЙ H307/2

1. НАЗНАЧЕНИЕ

Прибор самопишущий двухкоординатный типа H307 (в дальнейшем - прибор) предназначен для регистрации в прямоугольных координатах в линейном или логарифмическом масштабах функциональной зависимости двух измеряемых величин, представленных в виде электрических сигналов напряжения постоянного тока; синусоидального напряжения переменного тока (действующего значения) в диапазоне частот от 45 до 20000Hz с коэффициентом искажения кривой напряжения не более 0,2%; сопротивления постоянному току, а также одной из перечисленных величин в функции частоты или времени.

Далее рассмотрены характеристики прибора при измерении напряжений постоянного тока.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

- 2.1. Номинальные размеры длин координат поля регистрации:
координаты X – 350 мм;
координаты Y – 250 мм.
- 2.2. Цена деления диаграммной сетки бланка: при регистрации в линейном масштабе 1мм;
при регистрации в логарифмическом масштабе не менее 1мм.
- 2.3. Масштабы и диапазоны регистрации соответствуют значениям, указанным в табл.2.1,2.2.
- 2.4. Пределы плавной регулировки линейных масштабов регистрации (кроме масштаба 10 V/см) равны удвоенному значению масштаба регистрами.
- 2.5. Плавное некалиброванное смещение нуля обеспечивает установку регистрирующего устройства в любой точке диаграммного бланка.
- 2.6. Пределы допускаемых значений основной погрешности прибора при отсутствии

смещения нуля, выраженные в процентах от нормирующего значения, в линейном масштабе равны $\pm 0,5\%$. Нормирующее значение N , выраженное в единицах входного сигнала, определяется по формуле:

$$N = M (L_{\text{ном}} + L_{\text{см}}), \quad (1)$$

где M - масштаб регистрации в соответствии с табл. 2.1,2.2; $L_{\text{ном}}$ - номинальная длина координаты, см; $L_{\text{см}}$ - абсолютное значение смещения нуля, см (плюс $L_{\text{см}}$ - смещение нуля в направлении координатной оси, минус $L_{\text{см}}$ - в противоположном направлении).

- 2.7. Пределы допускаемых значений основной погрешности прибора, выраженные в процентах от нормирующего значения, в логарифмическом масштабе равны $\pm 1,5\%$. За нормирующее значение принимается верхний предел диапазона регистрации второй декады.

Таблица 2.1.

Масштаб регистра- ции mV/cm	Диапазоны регистрации постоянного напряжения mV					
	линейный масштаб		логарифмический масштаб			
	координата X	координата Y	координата X		координата Y	
			первая декада	вторая декада	первая декада	вторая декада
0,025	0-0,875	0-0,625	-	-	-	-
0,05	0-1,75	0-1,25	-	-	-	-
0,1	0-3,5	0-2,5	-	-	-	-
0,25	0-8,75	0-6,25	-	-	-	-
0,5	0-17,5	0-12,5	0,175-1,75	1,75-17,5	0,125-1,25	1,25-12,5
1	0-35	0-25	0,35-3,5	3,5-35	0,25-2,5	2,5-25
2,5	0-87,5	0-62,5	0,875-8,75	8,75-87,5	0,625-6,25	6,25-62,5
5	0-175	0-125	1,75-17,5	17,5-175	1,25-12,5	12,5-125
10	0-350	0-250	3,5-35	35-350	2,5-25	25-250
25	0-875	0-625	8,75-87,5	87,5-875	6,25-62,5	62,5-625

Примечания: 1. Диапазон регистрации прибора по каждой координате равен произведению масштаба на номинальную длину координаты.

2. При регистрации в логарифмическом масштабе с нормируемой погрешностью по п. 2.8 измеряемое напряжение не должно быть меньше 0,5 mV.

Таблица 2.2.

Масштаб регистра- ции V/cm	Диапазоны регистрации постоянного напряжения V					
	линейный масштаб		логарифмический масштаб			
	координата X	координата Y	координата X		координата Y	
			первая декада	вторая декада	первая декада	вторая декада
0,05	0-1,75	0-1,25	0,0175-0,175	0,175-1,75	0,0125-0,125	0,125-1,25
0,1	0-3,5	0-5,5	0,035-0,35	0,35-3,5	0,025-0,25	0,25-2,5
0,25	0-8,75	0-6,25	0,0875-0,875	0,875-8,75	0,0625-0,625	0,625-6,25
0,5	0-17,5	0-12,5	0,175-1,75	1,75-17,5	0,125-1,25	1,25-12,5
1	0-35	0-25	0,35-3,5	3,5-35	0,25-2,5	2,5-25
2,5	0-87,5	0-62,5	0,875-8,75	8,75-87,5	0,625-6,25	6,25-62,5
5	0-175	0-125	1,75-17,5	17,5-175	1,25-12,5	12,5-125
10	0-350	0-250	3,5-35	35-350	2,5-25	25-250

2.8. Входное сопротивление прибора с блоками постоянного напряжения, переменного напряжения и частоты не менее 1 МΩ.

2.9. Наибольшее допускаемое изменение погрешности, вызванное изменением напряжения питания в пределах $(220 \pm 22) / 33$ V, не превышает $\pm 0,25\%$. Дополнительная погрешность выражается так же, как основные погрешности.

2.10. Время установления рабочего режима 30 мин.

2.11. Смещение нуля прибора за 8 часов непрерывной работы не более 20 mV.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Технические данные стандартных прямоугольных волноводов.

Технические данные стандартных прямоугольных волноводов.

Английский тип R.C.S.C.	Американский тип E.I.A.	Внутренние размеры				Предельная частота колебаний вида TE_{01} , ГГц	рабочий диапазон, ГГц	Затухание, дБ/м	Номинальная мощность, кВт
		Ширина		Высота					
		в дюймах	в миллиметрах	в дюймах	в миллиметрах				
WG 1	WR 1800	18,000	457,2	9,000	228,6	0,327	0,41—0,61	0,001096	115000
WQ 2	WR 1500	15,000	381,0	7,500	190,5	0,393	0,51—0,75	0,001437	85000
WG 3	WR 1150	11,500	292,1	5,750	146,05	0,517	0,61—0,96	0,002014	45000
WG 4	WR 975	9,750	247,65	4,875	123,82	0,605	0,75—1,12	0,002648	33000
WG 5	WR 770	7,700	195,58	3,850	97,79	0,765	0,96—1,45	0,003937	21500
WG 6	WR 650	6,500	165,1	3,250	82,55	0,908	1,12—1,70	0,005057	14800
WQ 7	WR 510	5,100	129,54	2,250	64,77	1,154	1,45—2,20	0,007283	9300
WG 8	WR 430	4,300	109,22	2,150	54,61	1,375	1,70—2,60	0,009383	6500
WG 9A	WR 340	3,400	86,36	1,700	43,18	1,737	2,20—3,30	0,014764	4200
WG10	WR 284	2,840	72,14	1,340	34,04	2,080	2,60—3,95	0,018209	2800
WG11A	WR 229	2,290	58,17	1,145	29,08	2,579	3,30—4,90	0,024606	2000
WG12	WR 187	1,872	46,55	0,872	22,15	3,155	3,95—5,85	0,03435	1200
WG13	WR 159	1,590	40,39	0,795	20,19	3,710	4,90—7,05	0,041305	900
WG 14	WR 137	1,372	34,85	0,622	15,8	4,285	5,85—8,20	0,055774	620
WG15	WR 112	1,122	28,5	0,497	12,62	5,260	7,05—10,0	0,076706	420
WG16	WR90	0,900	22,86	0,400	10,16	6,56	8,20—12,4	0,1063	250
WG17	WR75	0,750	19,05	0,375	9,525	7,87	10,0—15,0	0,12861	205
WG18	WR62	0,622	15,8	0,311	7,9	9,49	12,4—18,0	0,17093	145
WG19	WR51	0,510	12,95	0,255	6,48	11,57	15,0—22,0	0,22966	95
WG20	WR42	0,420	10,63	0,170	4,32	14,08	18,0—26,5	0,35761	52
WG21	WR34	0,340	8,64	0,170	4,32	17,37	22,0—33,0	0,41994	43
WG22	WR28	0,280	7,11	0,140	3,56	21,10	26,5—40,0	0,56758	28
WG23	WR22	0,224	5,69	0,112	2,84	26,35	33,0—50,0	0,7874	18
WG24	WR19	0,188	4,78	0,094	2,30	31,4	40,0—60,0	1,0269	14
WG25	WR15	0,148	3,76	0,074	1,88	39,9	50,0—75,0	1,4665	8
WG26	WR12	0,122	3,10	0,061	1,55	48,4	60,0—90,0	1,9587	5
WG27	WR10	0,100	2,54	0,050	1,27	59,0	75,0—110	2,6476	3,8
WG28	—	0,0800	2,03	0,0400	1,02	73,8	90,0—140	3,7073	2,3
WG29	—	0,0650	1,65	0,0325	0,83	90,9	110—170	5,0524	1,5
WG30	—	0,0510	1,30	0,0255	0,65	115,8	140—220	7,3818	0,90
WG31	—	0,0430	1,09	0,0215	0,55	137,5	170—260	9,3832	0,65
WG32	—	0,0340	0,86	0,0170	0,43	173,3	220—325	13,2874	0,42

Допускается к защите

заведующий кафедрой Биомедфизики,

к.ф.-м.н., Широносов В. Г

«13» 06 2002 г.


подпись

Научный руководитель

заведующий кафедрой Биомедфизики,

к.ф.-м.н., Широносов В. Г

«13» 06 2002 г.


подпись

Рецензент

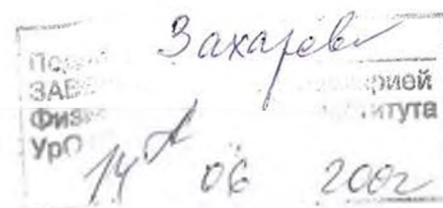
главный научный сотрудник ФТИ УрО РАН,

д.т.н. Захаров В. А.

«13» 06 2002 г.


подпись




Захаров
Физик
УрО
14 06 2002