

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Г.С. САДОВОЙ

МИКРОВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2010

УДК 621.385.6(075.8)
С 143

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *В. П. Разинкин*,
д-р техн. наук, проф. *В. А. Хрусталёв*

Работа подготовлена на кафедре радиоприёмных
и радиопередающих устройств для студентов НГТУ,
обучающихся по направлению «Радиотехника»,
специальностям «Радиотехника», «Радиосвязь, радиовещание
и телевидение» РЭФ и специальностям
«Многоканальные телекоммуникационные системы»,
«Средства связи с подвижными объектами»,
«Проектирование и технология радиоэлектронных средств»
заочного факультета

Садовой Г.С.

С 143 Микроволновая и квантовая электроника : учеб. пособие /
Г.С. Садовой. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 156 с.
ISBN 978-5-7782-1300-5

Пособие включает в себя перечень тем, задачи и описание лаборатор-
ных работ. Приведены основные термины и определения. Показана роль
микроволновой и квантовой электроники в информационных технологиях.
Описаны измерительные приборы, используемые для исследования пара-
метров и характеристик электронных приборов СВЧ и квантовых приборов.

Представлен ряд оригинальных методологических черт. Значительное
внимание уделяется приложению развитой автором концепции изменяющих-
ся систем к микроволновой и квантовой электронике. Перечислены компе-
тенции, которые должны сформироваться у студентов в результате изучения
курса. При оценке знаний студентов применяются зачётные единицы.

УДК 621.385.6(075.8)

Садовой Геннадий Степанович

МИКРОВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

Редактор *Л.Н. Ветчакова*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Подписано в печать 15.01.2010. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экз.
Уч.-изд. л. 9,06. Печ. л. 9,75. Изд. № 403. Заказ № 252. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

ISBN 978-5-7782-1300-5

© Садовой Г.С., 2010
© Новосибирский государственный
технический университет, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
1. Модули дисциплины	12
2. Описания лабораторных работ	19
<i>Лабораторная работа № 1. Изучение приборов и составление структурной схемы измерительной установки</i>	19
1. Термины, определения и условные обозначения	19
2. Цели лабораторной работы	21
3. Содержание отчёта.....	22
4. Варианты лабораторной работы	23
<i>Лабораторная работа № 2. Экспериментальное исследование транзисторного усилителя СВЧ</i>	42
1. Термины, определения и условные обозначения	42
2. Цели работы и домашнее задание	49
3. Содержание отчёта.....	50
4. Варианты лабораторной работы	51
<i>Лабораторная работа № 3. Экспериментальное исследование генератора на диоде Ганна</i>	52
1. Термины, определения и условные обозначения	52
2. Цели работы и домашнее задание	54
3. Содержание отчёта.....	56
4. Варианты лабораторной работы	56
<i>Лабораторная работа № 4. Экспериментальное исследование полупроводникового лазера</i>	57
1. Термины, определения и условные обозначения	57
2. Цели работы и домашнее задание	63
3. Содержание отчёта.....	63
4. Варианты лабораторной работы	64
<i>Лабораторная работа № 5. Вычислительный эксперимент с моделями физических процессов</i>	67
1. Термины, определения и условные обозначения	67
2. Цели работы и домашнее задание	69
3. Содержание отчёта.....	69
4. Варианты лабораторной работы	70
3. Задачи	79
1. Движение носителей заряда в электромагнитных полях.....	79
2. Полупроводниковые приборы СВЧ	82
3. Параметры и характеристики усилителей и автогенераторов	85
4. Цепи сверхвысоких частот	88

5. Приборы с электростатическим и электродинамическим управлением электронными потоками.....	91
6. Приборы с длительным взаимодействием электронов и бегущих электромагнитных волн.....	94
7. Приборы магнетронного типа.....	97
8. Спонтанное и индуцированное излучение	100
9. Приборы квантовой электроники	103
10. Методы создания электронной аппаратуры	106
11. Гетероструктуры	109
12. Нанопизика и наноэлектроника.....	112
4. Графические обозначения устройств и приборов СВЧ	115
5. Обозначения полупроводниковых приборов	123
6. Обозначения квантовых приборов.....	130
7. Единицы измерения величин	134
8. Электромагнитные волны и их использование	139
Заключение	146
Учебно-методические материалы	148
Основная литература	148
Дополнительная литература.....	148
Периодическая литература.....	149
Информационные ресурсы Интернета	150
<i>Приложение. Правила аттестации по дисциплине</i>	<i>151</i>
П1. Термины и определения	151
П2. Задачи изучения дисциплины и компетенции	152
П3. Оценки по разным шкалам	153
П4. Оценки по контрольным неделям и аттестация по дисциплине	155

ПРЕДИСЛОВИЕ

Информационные технологии используют большое количество физических явлений. Известно много конструктивных теорий, описывающих этот круг явлений и позволивших изобрести, исследовать и применить в конкретных системах приборы электроники. Особое место принадлежит фундаментальным теориям, основывающимся на математических соотношениях, имеющих широкую область приложений. Фундаментальные теории совершенны и надёжны в исходных положениях.

В предлагаемой книге особое внимание уделяется фундаментальным принципам и физическим законам, используемым в электронике. Автор создал научную концепцию систем с изменяющимися пространственно-временными соотношениями. Основные составляющие концепции: категория изменчивости, закон изменчивости и принцип изменчивости. Применительно к электронике это означает, что параметры и характеристики прибора зависят от пространственно-временных соотношений, характеризующих физические процессы и конструкцию прибора.

Большинство приборов – это преобразователи энергии постоянного тока в энергию электромагнитных колебаний. В лампе бегущей волны катод эмиттирует электроны непрерывно. Пространственно-временные соотношения в электронном потоке изменяются при взаимодействии электронного потока с бегущей замедленной волной. В результате удаётся получить эффект усиления.

В приборах с электростатическим управлением влияние пространственно-временных соотношений на свойства прибора может проявиться при попытке повысить рабочую частоту сигнала. Тогда время пролёта электронов может оказаться сравнимым с периодом колебаний, а межэлектродные ёмкости и индуктивности выводов могут составить часть колебательных контуров.

Предположительно, первую теорию возникающих при этом явлений разработал W. E. Benham (1928). Для случая режима малого сигнала он вычислил проводимость плоского и цилиндрического диодов, основываясь на уравнениях классической электродинамики. В последующие годы опубликовали результаты теоретических исследований Г.А. Гринберг, С.С. Wang и др. В статьях Г.А. Гринберга (1936 и 1938 гг.) не только рассмотрена работа диодов в линейном приближении, но также исследована реакция диода с плоскими электродами на прямоугольный импульс напряжения. Рассматривалась только та стадия переходного процесса, когда электроны ещё не долетели до анода. В 1941 г. статью, посвящённую электронике вакуумных ламп в режиме большого сигнала, опубликовал С.С. Wang. Развивая метод Г.А. Гринберга, он вывел интегро-дифференциальные уравнения, описывающие процессы в диоде в течение всего периода СВЧ напряжения. Количество уравнений зависит от вида пространственно-временной диаграммы движения электронов. Решение задачи из-за её сложности возможно только численными методами.

Метод Г.А. Гринберга был основой при исследовании триодных усилителей, которое выполнил Г.С. Рамм (1955). Численно проинтегрировав уравнения, он получил функции токов и скоростей в плоскости сетки. Недостатком подхода, предложенного Г.С. Раммом, является то, что расчёт распределения тока сведён к вычислению параметров некоего эквивалентного триода, работающего в статическом режиме. Введены понятия, не имеющие физического смысла, например, изменение межэлектродных расстояний во времени и др.

Sutherland A.D. предложил (1959) более корректный, чем у его предшественников, подход к анализу мощных триодов. Его исследование было первым, когда для анализа характеристик мощных приборов с электростатическим управлением стали использовать компьютеры. Садовой Г.С., автор настоящего пособия, разработал (1969, 1994) метод анализа физических процессов во входных зазорах цилиндрических ламп в режиме с отсечкой, создал математические модели мощных триодов и тетродов СВЧ, работающих в полигармонических граничных или перенапряжённых режимах с учётом распределения токов между электродами и влияния объёмного заряда во всех зазорах тетрода. Предложил методы решения полученных функциональных уравнений. Разработал компьютерные программы, реализующие решение выведенных уравнений. На основе математического моделирования предложил инженерные методы расчёта триодных и тетродных усилителей и автогенераторов СВЧ.

Когда-то существовало общепринятое мнение, что применение приборов с электростатическим управлением вследствие отрицательных эффектов, обусловленных инерцией электронов, будет ограничено метровыми волнами. Полагали, что на более высоких частотах лампы будут вытеснены приборами с динамическим управлением.

Прогресс в конструировании и технологии производства наряду с теоретическими исследованиями привёл к систематическому пересмотру этих прогнозов. Ещё в 1940 г. Н.Д. Девятков создал прототип триода для генерирования дециметровых электромагнитных волн. Лампы имели безындукционные концентрические электроды, которые легко сочленяются с внешними элементами объёмных резонаторов. Во время Второй мировой войны во многих странах были разработаны и нашли применение металлокерамические триоды с цилиндрическими выводами электродов, которые разделялись кольцами из керамики. Расстояния между электродами составляли десятые доли миллиметра. Такие лампы способны отдать на дециметровых волнах до сотен ватт в непрерывном режиме и до десятка киловатт в импульсном режиме.

Электроды современных мощных ламп охлаждают воздухом или проточной водой. При испарительном охлаждении анода удаётся обеспечить возможность непрерывной работы при удельной рассеиваемой мощности до 2 кВт/см^2 . Сетки мощных ламп выполняют из пирогرافита, что позволяет работать при повышенных уровнях мощности и изготавливать компактные приборы. Для увеличения мощности выполняют параллельное соединение размещённых по окружности тетродных секций, у которых сетки соединены общим металлическим диском. Катоды и аноды таких приборов соединены цилиндрами, сочленёнными с внешним резонатором. Чтобы повысить рабочую частоту, используют двустороннюю конструкцию резонаторов, когда максимальное напряжение находится в середине электронного луча.

До 1 ГГц в непрерывном режиме лампы могут обеспечить мощность порядка десятков киловатт и единицы мегаватт в импульсном режиме.

Лампы не требуют высокостабильных источников питания и магнитного поля, их можно устанавливать с внешними резонаторами. Удобство в эксплуатации и сравнительно низкая стоимость ламп позволяют использовать их в радиотехнике, энергетике СВЧ, в ускорителях элементарных частиц и т. д. Актуальной проблемой является задача повышения КПД и коэффициента усиления приборов с электростатическим управлением.

Более эффективным по сравнению с электростатическим оказался динамический способ управления электронным потоком, реализуемый в клистронах, лампах бегущей волны, магнетронах и других электровакуумных приборах. Оптимальные пространственно-временные соотношения в этих приборах можно получить благодаря конечному времени пролёта электронов в пространстве, свободном от электромагнитных полей, модуляция по скорости преобразуется в модуляцию по плотности.

В 1947 г. John Bardeen, Walter H. Brattain, William B. Shockley изобрели биполярный транзистор (Нобелевская премия по физике 1956 г.). Кристалл биполярного транзистора содержит два электронно-дырочных перехода. Если изменяется ток через один переход, то меняется сопротивление другого перехода.

Действие полевых (униполярных, канальных) транзисторов основано на изменении сопротивления слоя полупроводника, находящегося между двумя контактами. Ток обусловлен движением носителей заряда одного знака (электронов или дырок), причём ток изменяется под действием электрического поля, создаваемого входным сигналом. Вектор электрического поля перпендикулярен вектору скорости носителей заряда.

От электронных ламп транзисторы отличаются малыми размерами, низкими напряжениями источников питания, высокой экономичностью потребления электрической энергии, большим сроком службы, механической прочностью, надёжностью.

Первые попытки использования транзисторов в микроволновых диапазонах электромагнитных волн заставили обратить внимание на проблемы, аналогичные тем, которые проявились в лампах. Как и в электровакуумном триоде, в транзисторе СВЧ должны быть малыми время задержки сигнала, сопротивления выводов и межэлектродные ёмкости.

Начиная с 1960-х годов одиночные транзисторы вытесняются интегральными схемами. Современные чипы для компьютеров содержат миллионы транзисторов.

Основы квантовой электроники заложены А. Эйнштейном в двух статьях: 1905 и 1916 годов, однако идея создания монохроматических генераторов на основе индуцированного излучения была реализована лишь в 1954 г., когда на базе работ в области газовой радиоспектроскопии исследовали резонансные переходы в области СВЧ. Советские учёные А.М. Прохоров и Н.Г. Басов в Физическом институте Акаде-

мии наук СССР, а также Чарлз Харт Таунс в Колумбийском университете (США) создали первые квантовые генераторы. В качестве рабочей среды в них использовали пучок молекул аммиака, который пропускали через объёмный резонатор. Колебания в резонаторе возникали и поддерживались за счёт энергии, выделяемой при индуцированном излучении молекул. Чарлз Таунс придумал название для этого генератора: мазер – аббревиатура английского выражения Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Наряду с автогенераторами были созданы также мазеры-усилители на рубине, которые сразу же нашли широкое применение в радиотелескопах и глобальных линиях телекоммуникаций. После создания мазера в земных условиях радиоастрономы в некоторых областях космоса обнаружили источники монохроматического излучения. Метод создания инверсии населённости под воздействием внешнего источника накачки позволил создать квантовые усилители СВЧ на парамагнитных кристаллах. Такие усилители обладают самыми малыми шумами. В 1958 г. был предложен принцип работы оптического квантового генератора – лазера. Для создания лазера надо было решить фундаментальный вопрос о подходящем резонаторе. Дело в том, что даже при переходе от длинных волн к сверхвысокочастотным учёным и инженерам пришлось изобретать новый вид резонаторов – объёмные резонаторы, размеры которых сравнимы с длиной волны усиливаемых колебаний и которые совсем не похожи на колебательный контур из катушки индуктивности и конденсатора. При переходе к миллиметровым волнам параметры объёмных резонаторов резко ухудшаются: возрастают их потери, падает селективность, уменьшаются размеры. Выход был найден благодаря использованию открытых резонаторов типа резонаторов Фабри–Перо. Были предложены также новые методы создания инверсной населённости. Квантовые генераторы явились одним из замечательных открытий XX века. Важность их изобретения была отмечена присуждением Нобелевской премии по физике 1964 г. А.М. Прохорову, Н.Г. Басову (по 1/4 премии) и Ч. Таунсу (1/2 премии) «за фундаментальные исследования по квантовой электронике, которые привели к созданию генераторов и усилителей, основанных на мазер-лазерном принципе». Лазеры находят практическое применение в различных областях науки, техники и медицины. Монохроматическое излучение лазеров используется для спектроскопических исследований и в самых разнообразных системах передачи информации. Фундаментом современных информационных технологий являются опто- и микроэлектронные устройства на основе

полупроводниковых гетероструктур: быстродействующие транзисторы для спутниковых линий радиосвязи и базовых станций мобильных линий связи, лазерные диоды для оптоволоконных линий связи и т. д.

Шведская академия наук присудила половину нобелевской премии 2000 г. по физике совместно Жоресу Ивановичу Алфёрову (Санкт-Петербург, Россия) и Герберту Кремеру (Санта-Барбара, США) за разработку полупроводниковых гетероструктур для быстродействующей электроники и оптоэлектроники. Вторую половину премии получил Джек Килби (Даллас, США) за вклад в создание интегральных схем.

В динамических режимах работы микроволновых приборов (магнетрон, лампа бегущей волны, лавинно-пролётные диоды и другие приборы) изменяются пространственно-временные соотношения в электронных потоках или в полупроводнике. Эффект усиления сигнала наблюдается только при оптимальных параметрах конструкции и временных соотношений.

В гетероструктурах изменены пространственно-временные соотношения для фотонов или носителей заряда по сравнению с соответствующими соотношениями в гомоструктурах. Это изменение позволило резко улучшить свойства транзисторов и полупроводниковых лазеров. В частности, полупроводниковые гетеролазеры стали работать при комнатной температуре.

При переходе к нанотехнологиям и приборам, имеющим размеры в несколько десятков нанометров, роль пространственно-временных соотношений становится решающей, ещё более важной, чем в микроэлектронике. Понятно, что пространственно-временные соотношения определяют особенности функционирования и живых организмов.

Для построения современной информационной системы нужны электронные и квантовые приборы, которые выполняют функции генерации и усиления электромагнитных колебаний, преобразования частоты и модуляции. Номенклатура приборов весьма обширна: микроволновые электровакуумные и полупроводниковые приборы, квантовые приборы СВЧ и оптического диапазона. Радиоинженер должен представлять физические процессы в этих приборах, знать их характеристики и особенности конструкции, уметь выбрать подходящий для конкретного случая прибор.

В первом разделе книги приведена расширенная учебная программа. В зависимости от названия конкретной дисциплины, формы обучения (дневная или заочная) и курса некоторые модули можно опустить. К примеру, в усечённом виде перечень модулей соответствует таким

дисциплинам, как «Электроника СВЧ и квантовая электроника», «Электронные приборы и цепи СВЧ».

Помимо изучения теоретического материала предусматривается выполнение лабораторных работ и контрольных заданий. В учебном пособии приводится описание лабораторных работ и задачи для самостоятельного решения. Содержание материала соответствует современному уровню науки, техники, технологий. За основу приняты новейшие и хорошо обоснованные научные теории. Для облегчения изучения конкретных приборов СВЧ и квантовых приборов в пособии изложены необходимые термины и определения. Сравнительно большое количество вариантов лабораторных работ позволяет обучать студентов по индивидуальной программе. Некоторые лабораторные работы выполняются с применением компьютера.

Модернизация лабораторного оборудования и ремонт лаборатории были выполнены благодаря гранту НГТУ 2006 г. Измерители мощности МЗМ18 были приобретены при финансовой поддержке федеральной инновационной программы «Образование», 2008 г.

1. МОДУЛИ ДИСЦИПЛИНЫ

Модули охватывают программы лекций по нескольким дисциплинам, лабораторный практикум, индивидуальные задания для студентов всех форм обучения и темы докладов на студенческих семинарах и конференциях.

1.1. Фундаментальные взаимодействия. Адроны и лептоны, бозоны и фермионы. Определения терминов: «Микроволновая электроника», «Квантовая электроника», «Электронные приборы СВЧ», «Квантовые приборы». Электрон, его характеристики. Магнетон Бора. Диапазон сверхвысоких частот и оптический диапазон. Роль электроники СВЧ и квантовой электроники в современном мире. Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы в бытовой радиоэлектронной аппаратуре, в телекоммуникационных системах, радарх, ускорительной технике, в физическом эксперименте. Использование приборов СВЧ в установках на встречных пучках материи (коллайдерах), линейных ускорителях, лазерах на свободных электронах. Значение дисциплины «Микроволновая электроника и квантовая электроника» как одной из базовых дисциплин радиотехнических и телекоммуникационных специальностей. Общие сведения о принципе действия электронных приборов СВЧ и квантовых приборов. Электромагнитный спектр. Рекомендации государственной комиссии по радиочастотам. Свойства электромагнитных волн диапазона СВЧ. Терагерцевые волны ($10^{11} \dots 10^{13}$ Гц) – часть спектра между волнами СВЧ и инфракрасными волнами. Уникальные свойства электромагнитных волн терагерцевого диапазона.

1.2. Особенности устройств СВЧ. Классификация электронных приборов СВЧ по свойствам рабочей среды (вакуум, твердое тело, плазма), принципу действия, наличию постоянного магнитного поля и диапазону рабочих частот. Электронная эмиссия. Движение электронов в постоянном электрическом поле. Явление электростатической индукции. Наведение зарядов и токов свободными электронами.

Теорема Шокли–Рамо: её доказательство и физический смысл. Две физические ситуации, формула Грина, уравнение Лапласа. Применение теоремы к решению задачи вычисления наведённого заряда на закороченных электродах, между которыми движется слой электронов, и наведённого тока во внешней цепи. Прохождение тока в вакууме, конвекционный ток, ток смещения, полный ток. Время пролёта и угол пролёта электронов. Приборы с электростатическим управлением. Триод СВЧ. Устройство, влияние времени пролёта электронов на работу триода. Влияние конструкции электродов на параметры триодного усилителя и автогенератора на триоде. Токораспределение в триоде. Междуэлектродные емкости. Усилитель с общей сеткой. Тетроды СВЧ. Мощные генераторные триоды и тетроды.

1.3. Основные материалы полупроводниковой электроники: кремний, германий, арсенид галлия. Зависимость скорости носителей заряда в полупроводниках от напряжённости электрического поля. Гетеропереходы. Полупроводниковые диоды. Биполярные транзисторы, устройство и принцип действия, схемы включения. Принцип усиления транзисторных усилителей. Особенности работы транзисторов на сверхвысоких частотах. Физические процессы, определяющие частотные параметры транзистора. Предельная и граничная частоты, максимальная частота транзистора. Полевые транзисторы, устройство, принцип действия, схемы включения.

1.4. Полупроводниковые приборы СВЧ: смесительные диоды СВЧ, транзисторы, $p-i-n$ -диоды, туннельные диоды. Лавинно-пролётный диод: устройство, вольт-амперная характеристика, рабочая точка. Основные физические процессы – образование лавины носителей заряда, пролёт носителей. Режим с захваченной плазмой, пролётный режим. Особенности колебательной системы при реализации режимов работы. Эквивалентные параметры ЛПД. Диоды с объёмной неустойчивостью: энергетическая диаграмма, междолинный переход электронов, нарастание флуктуаций объёмного заряда в полупроводнике с отрицательной дифференциальной подвижностью. Усилитель на диоде Ганна: устройство, принцип действия, параметры. Генераторы на полупроводниковых приборах СВЧ. Усилители с циркуляторами.

1.5. Параметры и характеристики усилителей. Усилители малого сигнала и усилители большого сигнала. Формулы для электронного КПД, полного КПД, промышленного КПД. Коэффициент усилителя, выраженный в децибелах. Структурная схема усилителя. Частотная характеристика усилителя. Абсолютная и относительная полосы

частот. Механическая и электронная перестройка усилителя. Диапазон механической перестройки полосы усилителя. Амплитудная характеристика. Коэффициент шума усилителя: определение коэффициента шума, температура шума. Формула Найквиста. Уровень внеполосных излучений. Основные источники шума. Фликкер-шум.

1.6. Применение передающих линий и резонаторов на сверхвысоких частотах. Цепи СВЧ. Классификация линий передачи. Фазовая и групповая скорости распространения волн. Дисперсия скорости электромагнитных волн. Однородные и неоднородные линии передачи. Падающая и отражённая волны. Бегущая и стоячая волны. Коэффициент отражения, КБВ и КСВ, связь между ними. Согласования в трактах СВЧ. Трансформация сопротивлений и проводимостей. Круговая диаграмма сопротивлений и проводимостей передающих линий в полярной системе координат. Применение круговой диаграммы. Трансформаторы полных сопротивлений на СВЧ. Эквивалентная схема отрезка линии передачи в виде четырёхполюсника. Матричное описание СВЧ-устройств.

1.7. Принцип динамического управления электронным потоком. Клистроны – электровакуумные СВЧ-приборы с кратковременным взаимодействием электронов и переменного электрического поля. Типы клистронов, их назначение. Двухрезонаторный усилительный пролётный клистрон: устройство, принцип действия, пространственно-временная диаграмма движения электронов. Коэффициент взаимодействия электронов с электрическим полем резонатора. Эквивалентная схема входного резонатора пролётного клистрона. Элементы эквивалентной схемы, их физический смысл. Комплексная электронная проводимость. Монотрон. Группировка электронов в трубе дрейфа двухрезонаторного пролётного клистрона. Уравнение группировки, параметры группировки, угол пролёта невозмущенного электрона, закон сохранения заряда, форма импульсов конвекционного тока во втором зазоре. Разложение последовательности импульсов тока в ряд Фурье. Наведённый ток во втором резонаторе пролётного клистрона. Функции Бесселя. Эквивалентная схема выходной цепи. Электронный КПД пролётного клистрона, полный КПД, промышленный КПД. Амплитудная характеристика пролётного клистрона. Частотная характеристика пролётного клистрона. Двухрезонаторный клистрон как автогенератор. Клистрон – умножитель частоты: его устройство, принцип действия, параметры, области применения. Преобразовательный клистрон: устройство, принцип действия, параметры, области применения. Много-

резонаторный пролётный клистрон: устройство, принцип действия, особенности группировки электронов, влияние настройки промежуточных резонаторов. Параметры и характеристики: выходная мощность, коэффициент усиления, полоса рабочих частот, электронный КПД, амплитудная характеристика, области применения и особенности конструкции. Отражательный клистрон: устройство, пространственно-временная диаграмма, угол пролёта невозмущённого электрона в области отражателя. Уравнение группировки электронов в области отражателя. Эквивалентная схема и векторная диаграмма отражательного клистрона. Зоны генерации отражательного клистрона. Номер зоны. Оптимальное время пролёта и оптимальный угол пролёта. Баланс фаз и баланс амплитуд, частота и амплитуда установившихся колебаний. Зависимость частоты генерации от напряжения отражателя. Электронная перестройка частоты, диапазон и крутизна электронной перестройки. Механическая перестройка частоты, зависимость оптимального напряжения отражателя от частоты генерации. Минитрон.

1.8. Приборы с длительным взаимодействием электронов и бегущих электромагнитных волн. Достоинства этих приборов. Волны в неоднородных длинных линиях, согласованных с генератором и нагрузкой. Прямые и обратные пространственные гармоники, их фазовые скорости и волновые числа. Лампа бегущей волны О-типа: устройство и принцип действия, параметры и характеристики. Коэффициент усиления ЛБВ. Частотная характеристика. Факторы, влияющие на частотную характеристику ЛБВ. Лампа обратной волны О-типа: устройство, принцип действия, условие синхронизма, параметры и характеристики. Усилитель на лампе обратной волны (ЛОВ): устройство, принцип действия, применение. Автогенератор на ЛОВ: устройство, принцип действия, электронная перестройка частоты.

1.9. Приборы М-типа: определение, устройство, принцип действия, достоинства. Движение электронов в постоянных скрещённых электрическом и магнитном полях: уравнение движения и его проекции на декартовы оси координат. Постановка задачи, интегрирование уравнений движения, траектории электронов. Механическая аналогия движения электрона в скрещённых полях. Циклотронная частота, переносная скорость, радиус циклоиды. Магнетрон: устройство, принцип действия. Парабола критических режимов. Динамический режим работы магнетрона. Фазовый сдвиг колебаний в соседних резонаторах. Условие синхронизма в магнетроне. Виды и спектр колебаний анодного блока магнетрона. Колебания π -вида. Методы разделения видов

колебаний. Формирование электронных спиц, обмен энергией между бегущей волной и электронами. Рабочие характеристики магнетрона. Коэффициент полезного действия. Нагрузочные характеристики. ЛБВ и ЛОВ М-типа: устройство, принцип действия, особенности параметров и характеристик. Обращённый коаксиальный магнетрон. Амплитрон и стабилитрон: устройство, принцип действия, характеристики, применение. Митрон: особенности устройства, принцип действия, характеристики, применение. Мазер на циклотронном резонансе: устройство, принцип действия.

1.10. Квантовая электроника: принцип действия квантовых приборов, мазеры и лазеры. Распределения Ферми–Дирака и Бозе–Эйнштейна. Спонтанное и индуцированное излучение, коэффициенты Эйнштейна, населённость энергетического уровня. Населённость уровней при термодинамическом равновесии. Инверсная населённость и методы её создания. Коэффициент квантового усиления. Ширина спектральной линии. Квантовый парамагнитный усилитель: устройство, принцип действия, параметры, уровень шума. Квантовые автогенераторы. Условия стационарного режима квантового автогенератора. Автогенератор СВЧ на молекулах аммиака. Гелий-неоновый лазер: устройство, энергетическая диаграмма, рабочие переходы, зависимость мощности излучения от тока разряда. Методика измерения длины волны лазерного излучения. Инжекционный лазер с p – n -переходом: устройство, принцип действия, энергетическая зонная диаграмма, спектр излучения. Гетеропереходы, технология получения гетеропереходов. Полупроводниковые лазеры на гетеропереходах с резонатором Фабри–Перо. Полупроводниковый лазер с планарным оптическим резонатором: устройство, принцип работы и сравнение с лазером на основе резонатора Фабри–Перо. Открытие и исследование синхротронного излучения. Параметры и характеристики синхротронного излучения. Циклический ускоритель – релятивистский электронный прибор. Лазер на свободных электронах: устройство, принцип действия, области применения, спектр излучения. Конструктивные элементы лазера на свободных электронах: открытый резонатор, ондулятор, мощный генератор СВЧ. Основные методы модуляции лазерного излучения. Лазерные системы связи.

1.11. Современные методы создания электронной аппаратуры, обеспечивающей высокое быстродействие, малое энергопотребление, повышенную стойкость к внешним факторам. Принципы установки и пайки компонентов на поверхность. Технология поверхностного мон-

тажа (SMT – Surface Mounted Technology), её особенности и достоинства: сокращение размеров элементов, автоматизация монтажа, снижение себестоимости производства, повышение технических характеристик изделий, уменьшение объёма. Упрощение перепайки и замены элементов, возможность неоднократного использования плат. Необходимость специальной разработки, автоматизированного проектирования, наличие оборудования автоматизированной сборки, высокие требования к допускам и качеству. Сравнение с прежними технологиями монтажа выводов компонентов в металлизированные отверстия (PTH – Plated Trough Hole). Компоненты, предназначенные для SMT-технологий. Компоненты SMD (Surface Mounted Device), резисторы MELF (Metal electrode face resistors – резисторы с жёсткими торцевыми выводами), чип-резисторы, чип-конденсаторы, чип-индукторы, поверхностно-монтируемые дискретные полупроводниковые компоненты (диоды и транзисторы), интегральные микросхемы для поверхностного монтажа. Классификация типов компоновок, технология пайки при поверхностном монтаже.

1.12. Физические явления в гетероструктурах: односторонняя инжекция и суперинжекция, диффузия во встроенном квазиэлектрическом поле, электронное и оптическое ограничение, эффект широкозонного окна, диагональное туннелирование через гетерограницу. Приборы, в которых реализованы гетероструктуры: низкопороговые лазеры, высокоэффективные светодиоды, солнечные батареи и фотодетекторы на эффекте широкозонного окна, биполярные транзисторы с широкозонным эмиттером, преобразователи света из инфракрасного в видимый диапазон, тиристорные переключатели, холодные катоды. Полупроводниковая интегральная оптика. Технологические особенности: необходимость структур с хорошим согласованием параметров кристаллической решётки, использование многокомпонентных твёрдых растворов, эпитаксиальные технологии выращивания. Гетероструктуры с квантовыми ямами и сверхрешётками: особенности физических явлений и следствия для применений, технологические особенности. Гетероструктуры с квантовыми проволоками и квантовыми точками. Преимущество применения квантово-размерных структур. Методы изготовления таких структур.

1.13. Определения терминов: «нанофизика», «наномасштаб», «наноустройства», «нанотехнологии», «наноэлектроника», «микроэлектромеханика», «наноэлектромеханика», «нанотомография». Нанофизика и нанотехнологии как аргумент в пользу концепции изменяющихся

систем. Свойства атомов и твёрдых тел при наномасштабах. Наномагнитные материалы и приборы. Квантовые состояния в структурах пониженной размерности. Применение углеродных нанотрубок для создания высокопроизводительного телекоммуникационного оборудования. Особенности технологий управляемого выращивания наноструктур. Реализация и применение одноэлектронных приборов. Современное состояние рынка нанотехнологий и их применение в энергетике, электронике, медицине, промышленности.

2. ОПИСАНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИЗУЧЕНИЕ ПРИБОРОВ И СОСТАВЛЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

1. Термины, определения и условные обозначения

Абсолютная погрешность измерения – разность между найденными значениями измеряемой величины и её действительным значением.

Абсолютные единицы измерения мощности – мегаватт (МВт), киловатт (кВт), ватт (Вт), милливатт (мВт), микроватт (мкВт).

Аттенюатор – устройство, позволяющее уменьшить мощность или напряжение сигнала.

Децибел – внесистемная доляная единица логарифмической величины (уровня звукового давления, усиления, ослабления и т. п.). Обозначение – дБ. $1 \text{ дБ} = 0,1 \text{ Б}$.

Измерение – определение значения физической величины экспериментальным путём с помощью технических средств. Измерения характеристик радиоэлектронных устройств и систем имеют большое значение. Только измерение позволяет выяснить, насколько они удовлетворяют принятым стандартам. Периодические измерения характеристик усилителей и автогенераторов позволяют своевременно выявить и заменить устройства, которые не могут обеспечить решение задач, поставленных в техническом задании, а в случае неисправности оперативно обнаружить и устранить причину неисправности. Измерения электрических параметров устройств СВЧ необходимо проводить на установках, состоящих из средств измерений, прошедших приёмочные испытания или метрологическую аттестацию.

Измерительная линия – прибор для измерения коэффициента стоячей волны, полных сопротивлений, потерь в волноводах, длины волны

и добротности колебательной цепи. Измерения основаны на определении распределения поля внутри передающей линии.

Измерительный прибор – средство измерений для выработки сигнала измерительной информации, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Интерфейс – технические и программные средства, обеспечивающие взаимодействие устройств измерительного прибора или системы.

Коэффициентом отражения называется отношение комплексных амплитуд отражённой волны и падающей волны.

Коэффициентом стоячей волны напряжения в линии называется отношение наибольшей амплитуды вектора электрического поля к наименьшей амплитуде, измеряемой вдоль линии.

Метод измерений – последовательность приёмов с использованием измерительных приборов и приспособлений, выполняемых в процессе научной работы, при производстве и эксплуатации радиоаппаратуры. Способ исследования физических процессов.

Погрешности измерений случайные – переменные по величине и знаку погрешности, изменение которых не подчиняется какой-либо известной закономерности. Их причины имеют случайный характер.

Относительная погрешность измерения – выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности измерения к действительному значению измеряемой величины.

Относительные единицы измерения мощности – величины, определяемые как отношение абсолютной величины мощности P к 1 ватту,

выражаемое в децибелах $10 \lg \frac{P \text{ Вт}}{1 \text{ Вт}}$, или выражаемое в децибелах

отношение абсолютной величины мощности к одному милливатту.

Проверка средств измерений – определение метрологическим органом (организацией, представителем и т. д.) погрешностей средств измерений и установление их пригодности.

Принципиальная электрическая схема прибора – изображение, на котором показаны все элементы прибора в виде стандартных графических символов.

Промахи – один из основных типов ошибок, причиной которых является недостаток внимания экспериментатора. Для устранения промахов требуется величайшая тщательность и внимание во время измерений.

Систематические погрешности измерений – погрешности, величина которых одинакова во всех измерениях, проводящихся одним и тем же методом с помощью одних и тех же измерительных приборов.

Резонансный волномер – измерительный прибор, предназначенный для измерения длины электромагнитной волны. Простейшим волномером является колебательный контур, который отградуирован по частотам или по длинам волн.

Суммарная погрешность измерений – результирующая погрешность измерений, равная корню квадратному из суммы квадратов относительных частных погрешностей.

Структурная схема измерительного прибора – изображение, на котором показаны в самых общих чертах функциональные части прибора, их назначение и взаимосвязи. Структурными схемами пользуются при ознакомлении с принципом работы приборов, а также на первых этапах проектирования различных радиотехнических систем.

Функциональная схема – схема, занимающая промежуточное положение между принципиальными и структурными схемами и совмещающая в себе характерные черты обеих. Функциональные схемы используют при производстве и эксплуатации радиоэлектронных средств.

Эквивалентная схема (или схема замещения) – схема, составленная из радиоэлементов и наглядно представляющая сущность процессов в реальном замещаемом устройстве. Эквивалентная схема правильно воспроизводит свойства реального устройства только при некоторых ограничениях. Применяется при расчётах радиоэлектронных устройств, а также при анализе происходящих в них процессов.

2. Цели лабораторной работы

- Ознакомиться с конструкцией измерительных приборов.
- Изучить принцип действия измерительных приборов.
- Составить структурную схему измерительного прибора.
- Изобразить переднюю панель измерительного прибора, описать назначение регулировок и индикаторов.
- Изучить условные графические обозначения приборов СВЧ.

- Используя описания измерительных приборов, оценить частные погрешности измерений и суммарную погрешность измерений.
- Обосновать и составить структурную схему измерительной установки для экспериментального исследования микроволнового или оптического прибора.

Для получения допуска к лабораторной работе студенты должны внимательно изучить инструкции по технике безопасности, ответить на вопросы преподавателя и расписаться в журнале учёта лабораторных занятий. Студенты обязаны знать: основные термины и определения, единицы измерения в системе СИ, методы измерений, правила работы с измерительными приборами. Необходимо оценить значения токов, напряжений, мощностей, частот, которые будут измеряться приборами. Приступать к экспериментальной части лабораторной работы следует только после того, как станут понятными физические процессы в исследуемых устройствах и вид исследуемых характеристик. Продумывая и планируя эксперимент, надо исходить из того, чтобы в ходе исследования получить как можно больше сведений об исследуемом устройстве. При выполнении эксперимента необходимо проявлять самостоятельность. Например, самостоятельно определить количество точек на графике, выбрать диапазон частот и т. п.

3. Содержание отчёта

- Цели лабораторной работы.
- Выбор метода измерений.
- Перечень используемых приборов и приспособлений.
- Структурные схемы измерительных приборов.
- Описание работы приборов.
- Выбор и обоснование структурной схемы измерительной установки.
- Расчёт параметров.
- Анализ полученных результатов и выводы.
- Список использованной литературы и электронных адресов ресурсов Интернета.

Отчёт должен быть выполнен аккуратно, с соблюдением ГОСТа, без грамматических ошибок и исправлений. Рисунки и таблицы следует пронумеровать. Подписуочная подпись должна быть расположена *под* рисунком. Название таблицы должно быть *над* таблицей. Обязательно привести пояснения к методу измерений и к графикам. Если

экспериментальные графики качественно не совпадают с ожидаемыми зависимостями, необходимо сформулировать и привести в выводах гипотезы о причинах несовпадений. Пока студент не защитит отчёт по предыдущей работе, он не допускается к выполнению следующей лабораторной работы.

4. Варианты лабораторной работы

В а р и а н т 1. Изучение измерителя мощности СВЧ МЗМ-18 и составление структурной схемы измерительной установки для экспериментального исследования амплитудной характеристики транзисторного усилителя СВЧ

Основные сведения об измерителе мощности СВЧ МЗМ-18 (Руководство по эксплуатации, <http://www.micran.ru>)

Измеритель чувствителен к статическому напряжению. Перед подключением измерителя к любому источнику сигнала необходимо убедиться, что все приборы соединены с шиной защитного заземления. Для исключения сбоев в работе измерения следует производить при отсутствии резких перепадов напряжений, вызываемых включением и выключением мощных потребителей электроэнергии и мощных импульсных помех.

Измеритель предназначен для измерения мощности непрерывно генерируемых СВЧ-колебаний в диапазоне частот от 0,01 до 18,00 ГГц. Номер сертификата об утверждении типа средства измерений RU.C.35.007.A № 30573. Область применения – производство и контроль ВЧ и СВЧ-устройств и оборудования, исследование, настройка и испытания СВЧ-узлов, используемых в радиоэлектронике, связи, приборостроении, измерительной технике.

Нормальные условия эксплуатации измерителя: температура окружающего воздуха (25 ± 5) °С; относительная влажность воздуха, не более 80 %; атмосферное давление от 630 до 800 мм рт. ст. Измеритель может применяться в составе измерительных систем, имеет возможность дистанционного управления с ЭВМ при помощи программы «Измеритель мощности СВЧ», работающей под управлением операционных систем Windows 2000/XP. Интерфейс для связи измерителя с компьютером – USB 2.0.

Технические характеристики, устройство и работа измерителя мощности СВЧ МЗМ-18. Диапазон измерений мощности от $1 \cdot 10^{-4}$ до 10 мВт (от минус 40 до 10 дБм). Пределы допускаемой ос-

новой относительной погрешности измерений без учета погрешности рассогласования при количестве усреднений N не более $\pm 20,0\%$ ($\pm 0,8$ дБ).

Предел допускаемого среднего квадратичного отклонения случайной составляющей погрешности измерений не более 2,5 нВт. Пределы дополнительной относительной погрешности измерений при отклонении температуры окружающей среды от 25 °С на каждые 10 °С не более $\pm 15,0\%$ ($\pm 0,6$ дБ). Нелинейность амплитудной характеристики в диапазоне рабочих частот не более 0,6 дБ. Максимально допустимый уровень входной мощности не менее 16 дБм. Нестабильность показаний измерителя за 15 минут работы при изменении температуры окружающей среды не более чем на 1 °С определяется большим из значений: ± 1 единица счета или $\pm 0,01 \cdot P_{\text{изм}}$. Надо учесть, что одна единица счета составляет 0,1 дБ при выбранных единицах измерения «дБм»; 0,1 мВт, 0,1 мкВт или 0,1 нВт – при выбранных единицах измерения «Вт».

Значение коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН) входа СВЧ в диапазоне частот от 0,01 до 12,00 ГГц не более 1,4; на частотах свыше 12 ГГц КСВН входа не более 1,5.

Тип СВЧ соединителя (по ГОСТ РВ 51914) «Ш, вилка»; волновое сопротивление 50 Ом.

Время измерений не более $N/16$ с. Время установления рабочего режима не более 10 с.

Продолжительность непрерывной работы: от аккумулятора с подсветкой не менее 8 ч, от аккумулятора без подсветки не менее 16 ч, от зарядного устройства или ЭВМ не менее 24 ч.

Электропитание от зарядного устройства: входное напряжение частотой 50 Гц (220 ± 22) В; выходное напряжение постоянного тока ($6,0 \pm 0,3$) В; ток заряда не более 500 мА; время заряда не более 3 ч. Электропитание от USB: ток заряда не более 125 мА; время заряда не более 8 ч.

Габаритные размеры: длина не более 177,0 мм; ширина не более 48,0 мм; высота не более 32,5 мм.

Масса измерителя не более 0,35 кг; зарядного устройства не более 0,20 кг. Показатели надежности: средняя наработка на отказ 10 000 ч; средний срок службы измерителя 5 лет; срок службы аккумулятора 2 года.

Измеритель состоит из следующих блоков: детекторная секция, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), блок центрального процес-

сорного управления (ЦПУ), жидкокристаллический индикатор, клавиатура, интерфейс *USB*, аккумулятор. Принцип работы основан на преобразовании мощности синусоидального СВЧ-сигнала диодным амплитудным детектором в напряжение постоянного тока.

Напряжение, пропорциональное мощности СВЧ, подведенной к входу измерителя, усиливается, оцифровывается и подается в схему обработки под управлением микроконтроллера блока ЦПУ. Блок ЦПУ выполняет ряд математических и сервисных функций, таких как обработка результата измерений в соответствии с установленными параметрами и вывод на индикатор, частотная коррекция, запоминание результатов измерений, компенсация величины ослабления при использовании внешних аттенуаторов, самодиагностика. Учет в процессе измерений сохраненных в энергонезависимой памяти калибровочных коэффициентов минимизирует суммарную погрешность.

Измеритель может использоваться как в режиме ручного управления, так и в режиме дистанционного управления (управление и отсчет измеренных значений может производиться с помощью программы управления «Измеритель мощности СВЧ» на ЭВМ). Для дистанционного управления измерителем с ЭВМ используется интерфейс *USB*.

Зарядка аккумулятора производится либо от *USB* порта, либо от электрической сети 220 В при помощи специализированного зарядного устройства. Проведение измерений возможно во время зарядки только от *USB* порта ЭВМ. Продолжительность работы измерителя во время зарядки от *USB* не должна превышать 24 ч. Временной интервал между рабочими циклами, при работе с использованием зарядного устройства или совместно с ЭВМ, должен быть не менее 30 мин.

Перед началом работы необходимо провести внешний осмотр, убедиться в отсутствии механических повреждений измерителя и сохранности защитных пломб предприятия-изготовителя. Убедиться, что коаксиальный соединитель входа СВЧ-измерителя не поврежден, на внутренних поверхностях соединителя отсутствуют следы коррозии, металлическая стружка, загрязнения.

После транспортирования измерителя в условиях, отличных от рабочих, необходимо выдержать его в выключенном состоянии в рабочих условиях эксплуатации не менее 30 мин. Если измеритель не включается, то надо зарядить аккумулятор.

В а р и а н т 2. Изучение осциллографа и составление структурной схемы измерительной установки для экспериментального исследования частотной характеристики транзисторного усилителя СВЧ

- Знакомство с конструкциями транзистора СВЧ, изучение принципиальной схемы многокаскадного усилителя на транзисторах СВЧ.
- Изучение структурной схемы и правил эксплуатации генератора стандартных сигналов.
- Изучение структурной схемы и правил эксплуатации универсального автоматического осциллографа, приобретение навыков измерения характеристик и расчета параметров.

Осциллограф (от лат. *oscillo* – качаюсь и греч. *grapho* – пишу) – прибор для записи или визуального наблюдения изменений электрического тока или напряжения во времени, а также для измерений различных электрических величин: напряжения, силы тока, частоты тока, сдвига фаз, длительности и частоты повторения импульсов и т. д.

Используя осциллограф, можно наблюдать и измерять быстро изменяющиеся физические параметры различных физических процессов, такие как ускорение, скорость, давление и др. Для этого надо преобразовать с помощью датчиков неэлектрические величины в электрические.

Исследуемый процесс изображается на экране осциллографа в виде линий или фигур (осциллограмм). Чаще всего осциллограммы представляют собой зависимость напряжения во времени. К горизонтальным отклоняющим пластинам электронно-лучевой трубки подводится напряжение развёртки от автономного генератора. Измеряемый сигнал подаётся на широкополосный усилитель, имеющий полосу пропускания от 0 до 1 МГц (в осциллографах низкой частоты) и от 5 до 100 МГц и выше (в осциллографах высокой частоты, импульсных, стробоскопических и др.).

Частотными характеристиками называют характеристики, выражающие зависимость амплитуды, фазы, коэффициента усиления или какого-либо другого параметра линейного устройства или линейной системы от частоты гармонических колебаний. В данной лабораторной работе необходимо исследовать зависимость коэффициента усиления микроволнового транзисторного усилителя от частоты синусоидального сигнала при неизменной мощности входного сигнала.

Метод измерения частотной характеристики. Экспериментальное исследование частотной характеристики следует выполнить компенсационным методом. Суть метода состоит в том, что эффект усиления радиосигнала уравнивают увеличением ослабления аттенюатора, так что эффект усиления и ослабления не оказывает влияния на осциллограмму детектированного сигнала. Измерения выполняют в несколько этапов.

На первом этапе надо выполнить калибровку генератора сигналов. Для этого собирают измерительную установку по схеме рис. 1.1. Установка содержит: генератор СВЧ, полупроводниковый диод, фильтр нижних частот и осциллограф. Генератор надо перевести в режим генерации радиоимпульсов. После детектирования сигнал в виде прямоугольных импульсов поступает на вход осциллографа. Регулируя затухание аттенюатора, устанавливают уровень сигнала на экране осциллографа, удобный для индикации. Обычно принимают размах импульса на экране осциллографа порядка 5...10 мВ.

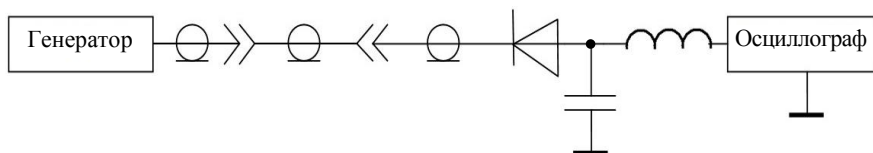


Рис. 1.1. Структурная схема измерительной установки для калибровки уровня сигнала генератора стандартных сигналов

Необходимо опытным путём оценить полосу усиления усилителя, а затем выбрать число точек измерения и интервал. Поочерёдно устанавливая значения частоты, поддерживать на каждой частоте одно и то же значение сигнала S_0 на экране осциллографа. В таблицу занести показания аттенюатора, соответствующие каждой частоте. Построить на графике калибровочную кривую – зависимость K_{A0} затухания аттенюатора как функцию частоты при неизменной величине сигнала на экране осциллографа.

На втором этапе в структурную схему включить транзисторный усилитель СВЧ (ТУ) между генератором и детектором (рис. 1.2). Регулируя затухание аттенюатора, устанавливать для тех же частот, что и при калибровке, величину сигнала S_0 . Составить таблицу значений затуханий аттенюатора $K_{AУ}$ в функции частоты. Выразить коэффициент

усиления усилителя K_P через K_{A0} и K_{Au} , затем по табличным данным построить частотную характеристику.

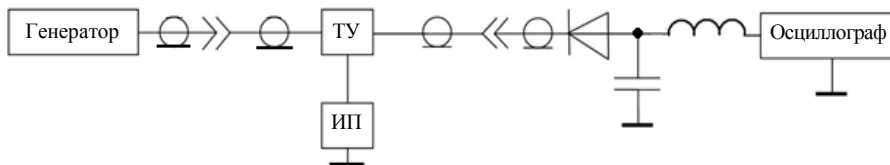


Рис. 1.2. Структурная схема измерительной установки для исследования частотной характеристики транзисторного усилителя

По результатам измерений вычислить абсолютную и относительную полосу частот транзисторного усилителя на некотором уровне усиления. Объяснить, как влияют различные факторы на полосу усиления.

Повторить измерения ещё для двух значений амплитуды входного сигнала. Выяснить, является ли линейным исследованный усилитель.

В а р и а н т 3. Изучение измерителя мощности и составление структурной схемы измерительной установки для экспериментального исследования шумов усилителя СВЧ

- Изучение руководства по эксплуатации (<http://www.micran.ru>).
- Изучение структурной схемы измерителя мощности СВЧ типа МЗМ-18, принципа его работы, режимы работы, системы команд, особенности работы измерителя вместе с персональным компьютером.
- Приобретение навыков измерения уровня шума и коэффициентов шума усилителей и генераторов.

Измеритель мощности СВЧ МЗМ-18 – компактный переносной прибор (рис. 1.3) с автономным питанием, встроенной клавиатурой и дисплеем. Предназначен для измерения мощности синусоидальных СВЧ-сигналов в коаксиальном тракте 7,0/3,04 мм (50 Ом). Результаты измерений могут отображаться на дисплее в линейных, логарифмических и относительных единицах. Прибор может использоваться при исследовании, испытании и настройке СВЧ-устройств, применяемых в радиоэлектронике, связи, измерительной технике и приборостроении.

Возможно подключение к персональному компьютеру по интерфейсу USB 2.0. Измеритель предназначен для работы в лабораторных и полевых условиях.



Рис. 1.3. Измеритель мощности МЗМ-18

Динамический диапазон: от -60 до $+20$ дБм. Расширение динамического диапазона возможно путём подключения внешнего устройства (аттенюатора или усилителя). Коррекция результата измерения с учётом внешнего устройства осуществляется автоматически. Если уровень измеряемой мощности находится вне заданного пользователем интервала, включается звуковое оповещение. Электропитание осуществлено от внутренней батареи или через USB. Зарядка аккумулятора производится либо от USB порта, либо от промышленной сети при помощи зарядного устройства. Во время зарядки возможно проведение измерений.

Измеритель мощности состоит из следующих блоков: детекторная секция, аналого-цифровой преобразователь (АЦП); блок центрального процессорного управления (ЦПУ); жидкокристаллический индикатор, клавиатура, интерфейс USB, блок питания. Принцип действия прибора основан на преобразовании мощности гармонического сигнала СВЧ диодным амплитудным детектором в постоянное напряжение, величина которого пропорциональна мощности СВЧ-сигнала.

Это напряжение усиливается, преобразуется в цифровой сигнал, а затем обрабатывается микроконтроллером блока ЦПУ. Микроконтроллер выполняет математические и сервисные функции. Среди них – обработка результата измерений в соответствии с установленными параметрами и вывод на индикатор, частотная коррекция, запоминание результатов измерений, компенсация величины ослабления при

использовании внешних аттенуаторов, и самодиагностика измерителя. Учет в процессе измерений сохраненных в энергонезависимой памяти калибровочных коэффициентов минимизирует суммарную погрешность измерений. Управление измерителем осуществляется вручную или дистанционно с ЭВМ, для чего на лицевой панели (рис. 1.4, *а*) и с правой стороны (рис. 1.4, *б*) предусмотрены органы управления и разъемы. В табл. 1.1 указаны номера элементов и их функции.

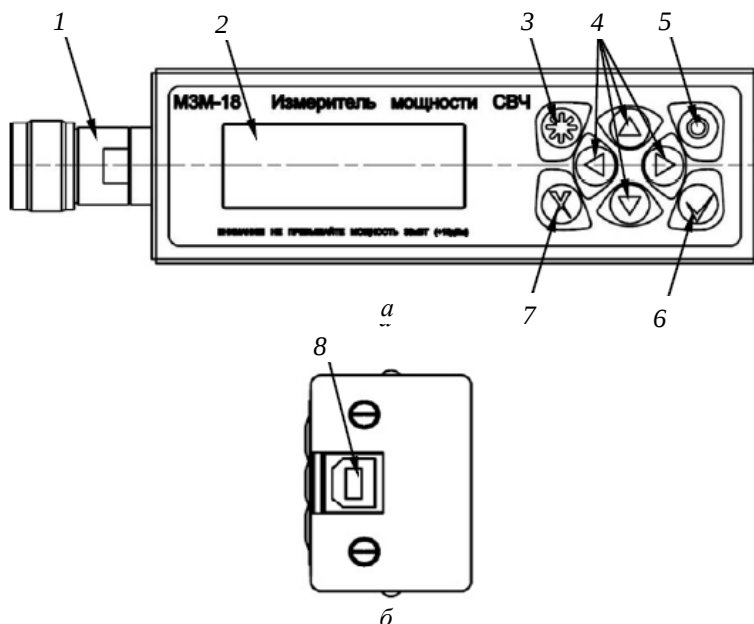


Рис. 1.4. Элементы управления и индикации:

а – вид сверху; *б* – вид справа

Для сохранения результатов измерений имеются 10 ячеек памяти. Сохранённые значения можно использовать как опорные в режиме измерения относительной мощности СВЧ.

Для сохранения настроек и быстрого переключения между ними предусмотрено 10 вариантов различных параметров измерений. Программное обеспечение персонального компьютера предназначено для дистанционного управления прибором и статистической обработки результатов измерений (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Название и основные функции элементов

Номер элемента	Название	Описание
1	Вход СВЧ	Разъём для подключения к источнику сигнала
2	ЖК-индикатор	В режиме измерений на индикаторе отображается значение уровня входной мощности СВЧ в выбранных единицах измерения с учётом калибровочных данных, а также дополнительная информация о режиме и состоянии измерителя; в режиме меню – параметр, значение которого может быть установлено или изменено при помощи клавиш управления
3	Подсветка	Клавиша включения/выключения подсветки индикатора
4	Клавиши навигации	В режиме измерений выполняют функции «горячих клавиш» (пункт «Выбор и установка параметров измерений»). В режиме меню осуществляют навигацию по пунктам меню, а также ввод параметров
5	Вкл/выкл.	Клавиша включения/выключения измерителя
6	Ввод	Клавиша выбора пунктов меню и подтверждения введённых данных
7	Меню/Отмена	В режиме измерений клавиша выполняет переход в режим меню. В режиме меню – выход из режима или отмена введённых значений при выходе из пункта меню
8	Разъём USB	Разъём для подключения измерителя к ЭВМ и зарядки аккумулятора

Режимы работы: режим измерений, режим меню. При включении измеритель переходит в режим измерений, при этом на индикаторе указывается символ «И», значение уровня входной мощности СВЧ в выбранных единицах измерения, индикатор заряда аккумулятора, значение частоты при частотной коррекции и значение ослабления при

компенсации внешнего аттенюатора. Если измеритель не подключен к источнику СВЧ-колебаний, то на индикаторе индицируется значение мощности шума.

Переход из режима измерений в режим меню производится нажатием клавиши «Меню/Отмена», при этом на индикаторе отображается символ «М» и название одного из пунктов меню. В режиме меню производится выбор и установка параметров измерений. Возврат из режима меню осуществляется повторным нажатием клавиши «Меню/Отмена». Навигация по меню производится клавишами «▲» «▼», выбор пункта меню – при нажатии клавиши «Ввод», выбор или изменение значения параметра – клавишами «◀» «▶». Выход из пункта меню с подтверждением выбора происходит при нажатии клавиши «Ввод», выход без сохранения изменений – при нажатии клавиши «Меню/Отмена».

Выбор единиц измерения: в режиме измерений нажать клавишу «Меню/Отмена» для входа в меню; используя клавиши «▲» или «▼», выбрать пункт «Единицы измерения» и нажать клавишу «Ввод»; с помощью клавиш «◀» или «▶» выбрать одну из двух единиц измерения: «дБм» или «Вт», нажать клавишу «Ввод» для сохранения изменений или клавишу «Меню/Отмена» для выхода в основное меню. При включенном режиме относительных измерений появляется дополнительная единица: «дБ». Для перехода в режим измерений нажать клавишу «Меню/Отмена».

Частотная коррекция неравномерности амплитудно-частотной характеристики детектора (преобразователя мощности СВЧ) выполняется в зависимости от введенного значения частоты входного сигнала. При этом к результату измерений автоматически добавляется соответствующий калибровочный коэффициент. Для установки частоты, на которой выполняется измерение, необходимо:

- в режиме измерений нажать клавишу «Меню/Отмена» для входа в меню;

- используя клавиши «▲» или «▼», выбрать пункт «Частотная коррекция» и нажать клавишу «Ввод»;

- с помощью клавиш «◀» или «▶» установить значение частоты в диапазоне от 0,1 до 18 ГГц с шагом 0,5 ГГц, на которой будут производиться измерения, и нажать клавишу «Ввод» для сохранения изменений или клавишу «Меню/Отмена» для выхода в основное меню;

- нажать клавишу «Меню/Отмена» для перехода в режим измерений.

Также значение частоты можно установить в режиме измерений. Для этого последовательно нажимая одну из клавиш «▲» или «▼», проверить, чтобы в верхней части индикатора отображалось требуемое значение частоты измерений. Введенное значение частоты измерений указывается в верхней части экрана.

Установка компенсации ослабления:

- в режиме измерений нажать клавишу «Меню/Отмена» для входа в меню;

- используя клавиши «▲» или «▼», выбрать пункт «Компенсация ослабления» и нажать клавишу «Ввод»;

- с помощью клавиш «◀» или «▶» установить значение ослабления внешнего аттенюатора на частоте измерений в диапазоне от 0 до 60 дБ с шагом 1 дБ, и нажать клавишу «Ввод» для сохранения изменения или клавишу «Меню/Отмена» для выхода в основное меню;

- нажать клавишу «Меню/Отмена» для перехода в режим измерений.

Значение ослабления можно установить в режиме измерений:

- последовательно нажимая одну из клавиш «◀» или «▶», проверить, отображается ли в верхней части индикатора требуемое значение величины ослабления. При удержании нажатой клавиши происходит изменение ослабления с шагом 1 дБ.

Значение величины ослабления указывается в верхней части индикатора. Результат измерений автоматически увеличивается на введенное значение.

Установка количества усреднений: в режиме измерений нажать клавишу «Меню/Отмена» для входа в меню; используя клавиши «▲» или «▼», выбрать пункт «Количество усреднений» и нажать клавишу «Ввод»; с помощью клавиш «◀» или «▶» установить количество усреднений N от 1 до 64 с шагом 2^N или «Авто» и нажать клавишу «Ввод» для сохранения изменений или клавишу «Меню/Отмена» для выхода в основное меню; нажать клавишу «Меню/Отмена» для перехода в режим измерений.

В режиме «Авто» количество усреднений устанавливается автоматически в зависимости от уровня мощности входного СВЧ сигнала, при этом включается режим считывания с предварительным усреднением. При установке любого количества усреднения, за исключением выбора «Авто», режим считывания с предварительным усреднением отключается (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Рекомендуемое количество усреднений

Уровень измеряемой мощности, дБм	Количество усреднений
От +10 до –15	4
От –15 до –20	8
От –20 до –25	16
От –25 до –35	32
От –35 до –40	64

Зависимость времени измерений $t_{\text{изм}}$ от количества усреднений N определяется выражением $t_{\text{изм}} = N/16$. В дистанционном режиме работы время считывания отличается от времени измерений на интервал, определяемый используемым интерфейсом обмена данных, программным обеспечением и загрузкой операционной системы ЭВМ.

Установка режима относительных измерений. Измерения можно производить относительно текущего измеренного значения мощности СВЧ или относительно одного из трех ранее сохраненных значений.

Измерение относительно текущего значения мощности СВЧ:

– в режиме измерений нажать клавишу «Меню/Отмена» для входа в меню;

– используя клавиши «▲» или «▼», выбрать пункт «Относительные измерения» и нажать клавишу «Ввод»; на индикаторе появится значение текущего уровня мощности СВЧ, относительно которого будут выполняться измерения;

– нажать клавишу «Ввод» для подтверждения и перехода в режим измерений или клавишу «Меню/Отмена» для выхода в основное меню; при подтвержденном режиме относительных измерений на индикаторе должно отображаться близкое к 0,0 дБ значение в зависимости от флуктуации мощности СВЧ входного сигнала;

– при необходимости нажать клавишу «Меню/Отмена» для перехода в режим измерений.

Измерение мощности СВЧ относительно сохраненного значения:

– в режиме измерений нажать клавишу «Меню/Отмена» для входа в меню;

– используя клавиши «▲» или «▼», выбрать пункт «Относительные измерения» и нажать клавишу «Ввод»; на индикаторе появится

значение текущего уровня мощности СВЧ или сохраненного в одной из ячеек памяти;

- с помощью клавиш «◀» или «▶» выбрать требуемую ячейку памяти; номер ячейки и сохраненное в ней значение отображаются на индикаторе;

- нажать клавишу «Ввод» для подтверждения и перехода в режим измерений или клавишу «Меню/Отмена» для выхода в основное меню;

- при необходимости нажать клавишу «Меню/Отмена» для перехода в режим измерений.

Быстрое сохранение результатов измерений в три ячейки памяти: (выполняется только в режиме измерений): удерживая клавишу «Ввод», нажать одну из трех клавиш «▲», «▶» или «▼», соответствующих 1, 2 и 3-й ячейкам памяти. На индикаторе появится номер выбранной ячейки, в которой были сохранены данные. Для перезаписи повторно нажать одну из приведенных комбинаций.

Выключение режима «Относительные измерения» происходит при смене единиц измерения в пункте меню «Единицы измерения».

Установка режима измерений максимального значения мощности СВЧ:

- в режиме измерений нажать клавишу «Меню/Отмена» для входа в меню;

- используя клавиши «▲» или «▼», выбрать пункт «Максимальное значение» и нажать клавишу «Ввод»;

- с помощью клавиш «◀» или «▶» выбрать «Вкл» и нажать клавишу «Ввод» для сохранения изменений или клавишу «Меню/Отмена» для выхода в основное меню;

- нажать клавишу «Меню/Отмена» для перехода в режим измерений.

На индикаторе будет отображаться максимальное измеренное значение мощности СВЧ и символ «М», соответствующий включенному состоянию режима.

Для выключения режима повторить перечисленные выше действия, выбрав «Откл».

Выбор языка:

- в режиме измерений нажать клавишу «Меню/Отмена» для входа в меню;

- используя клавиши «▲» или «▼», выбрать пункт «English» для перехода с русского языка на английский и пункт «Русский» – для перехода в обратном порядке. В соответствии с выбранным языком

осуществляется отображение единиц измерения и названия пунктов меню;

– нажать клавишу «Ввод» для сохранения изменений или клавишу «Меню/Отмена» для выхода в режим измерений (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Перечень соответствий

Русский язык	Английский язык
Единицы измерения	dB/mW setup
Частотная коррекция	Frequency correction
Компенсация ослабления	Offset
Количество усреднений	Average
Относительные измерения	Rel setup
Максимальное значение	Peak hold
Энергосбережение	Power saving
Сброс настроек	Default settings

Использование экономичного режима работы:

– в режиме измерений нажать клавишу «Меню/Отмена» для входа в меню;

– используя клавиши «▲» или «▼», выбрать пункт «Энергосбережение»; нажать клавишу «Ввод»;

– с помощью клавиш «◀» или «▶» выбрать «Вкл» и нажать клавишу «Ввод» для перехода в режим работы с экономичным использованием заряда аккумулятора или клавишу «Меню/Отмена» для выхода в основное меню; для выключения данного режима выбрать «Откл»;

– нажать клавишу «Меню/Отмена» для перехода в режим измерений.

В экономичном режиме работы производится выключение измерителя через 15 мин в следующих случаях:

– при отсутствии передачи данных по *USB* в режиме дистанционного управления;

– в течение 15 мин не была нажата ни одна клавиша управления измерителем.

Установка параметров по умолчанию:

- в режиме измерений нажать клавишу «Меню/Отмена» для входа в меню;
- используя клавиши «▲» или «▼», выбрать пункт «Сброс настроек» и нажать клавишу «Ввод»;
- включить измеритель (табл. 1.4).

Т а б л и ц а 1.4

Перечень параметров по умолчанию

Параметр	Значение по умолчанию
Единицы измерения	дБм
Частотная коррекция	0,1 ГГц
Компенсация ослабления	0 дБ
Количество усреднений	4
Режим относительных измерений	Выключен
Максимальное значение	Выключено
Язык	Английский

Измерение мощности СВЧ сигнала. Измеритель может работать при электропитании от встроенного аккумулятора, через порт USB ЭВМ или от специализированного зарядного устройства, подключенного к сети переменного тока 220 В 50 Гц. Измерение проводить в следующей последовательности:

- нажать и удерживать клавишу «Вкл/выкл.» до появления индикации;
- выдержать измеритель во включенном состоянии не менее 10 с;
- установить параметры измерений;
- соединить вход измерителя с источником сигнала;
- зафиксировать значение мощности СВЧ-сигнала, отображаемое на индикаторе;
- если требуется выключение измерителя, нажать, удерживая клавишу «Вкл/выкл.» в течение нескольких секунд;
- отсоединить измеритель от источника сигнала.

При подключении измерителя к выходу источника сигнала возникает погрешность рассогласования, обусловленная несоответствием выходного импеданса источника и входного импеданса измерителя волновому (характеристическому) сопротивлению линии передачи.

Дополнительная составляющая погрешности измерений $\delta_{\text{рас}}$, %, вызванная рассогласованием, рассчитывается по формуле

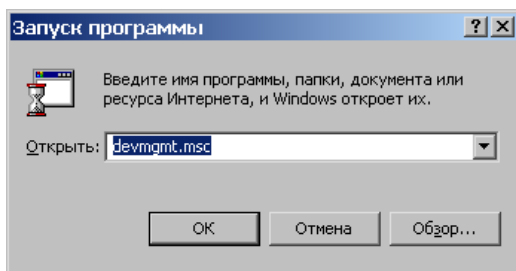
$$\delta_{\text{рас}} = \pm 2 |\Gamma_{\text{ист}}| |\Gamma_{\text{изм}}| 100,$$

где $|\Gamma_{\text{ист}}|$ – модуль коэффициента отражения выхода источника сигнала; $|\Gamma_{\text{изм}}|$ – модуль коэффициента отражения входа измерителя.

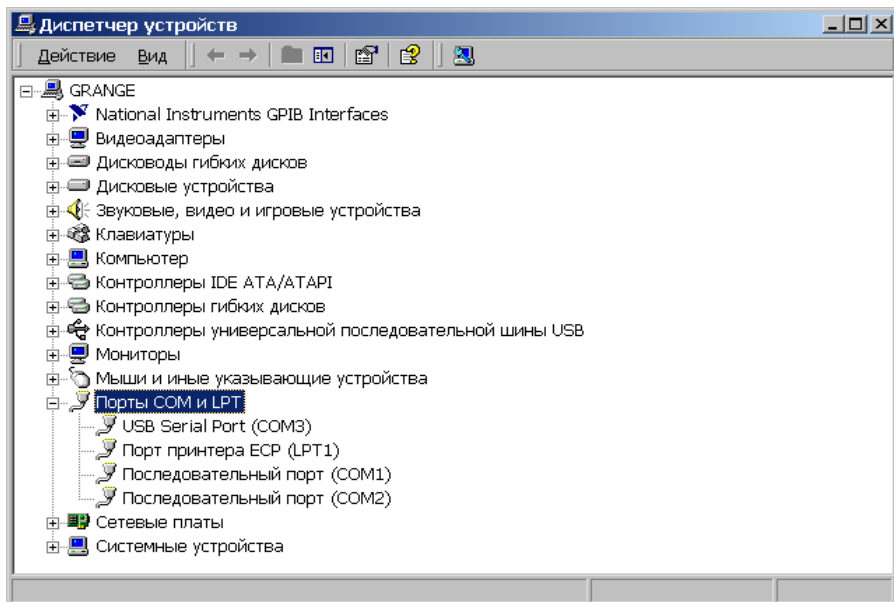
Работа измерителя совместно с компьютером. Измеритель работает с операционной системой Windows 2000/XP. Для работы с ЭВМ требуется провести установку драйверов измерителя. Если драйверы измерителя или драйверы для виртуальных COM-портов (табл. 1.6) уже установлены на данном компьютере, то установку драйверов производить не требуется. При подключении к USB-порту измеритель включается автоматически. Через 5–10 с компьютер сообщит об обнаружении нового устройства и предложит пользователю установить драйвер устройства с помощью «Мастера обнаружения нового оборудования».

Подключение измерителя мощности к компьютеру. Работа с устройством осуществляется точно так же, как если бы устройство было подключено через COM-порт. Драйвер виртуального последовательного интерфейса создает объект COM-порта с ClassGUID={4d36e978-e325-11ce-bfc1-08002be10318}. Операционная система воспринимает этот объект как физический объект, у которого есть имя (MS-DOS name).

Имена портов имеют вид: «\\.\COMn», где n – число от 1 до 99, которое задаётся операционной системой на основании информации предоставляемой драйвером. Для определения n необходимо запустить «Диспетчер устройств». Для этого нажать одновременно клавиши Windows+R (или мышью выбрать: **Пуск->Выполнить...**), появится окно:



Ввести в строку `devmgmt.msc` и нажать ОК. Появится окно:



В разделе «Порты COM и LPT» необходимо найти соответствующее устройство: «USB Serial Port(COMn)», где n – номер порта, к которому подключен измеритель мощности.

Система команд. Команды, используемые для управления измерителем мощности, делятся на два типа: а) установка и считывание параметров измерений; б) считывание результатов измерений.

Команды установки и считывания параметров измерений состоят из трёх байтов. Первые два байта обозначают устанавливаемый параметр, третий – его значение. Для работы с командами данного типа достаточно трехбайтного буфера.

Ниже приведены примеры, которые написаны на языке программирования C/C++. Для описания программы будет использоваться трехбайтный буфер `DataBuff` формата `unsigned char`.

Формирование команды частотной коррекции:

```
DataBuff[0] = 'F';
```

```
DataBuff[1] = 'R';
```

```
DataBuff[2] = X,
```

где X – номер частоты (табл. 1.5).

Отправка команды:
ComPort1->Write(DataBuff,3).

Т а б л и ц а 1.5

Соответствие между частотой и параметром X

X	Частота , ГГц	X	Частота, ГГц
0	0,1	20	10
1	0,5	21	10,5
2	1	22	11
3	1,5	23	11,5
4	2	24	12
5	2,5	25	12,5
6	3	26	13
7	3,5	27	13,5
8	4	28	14
9	4,5	29	14,5
10	5	30	15
11	5,5	31	15,5
12	6	32	16
13	6,5	33	16,5
14	7	34	17
15	7,5	35	17,5
16	8	36	18
17	8,5	37	
18	9	38	
19	9,5	39	

Формирование команды для степени усреднения

DataBuff[0] = 'A';
DataBuff[1] = 'V';
DataBuff[2] = X.

Отправка команды :

ComPort1->Write(DataBuff,3),

где X может быть равен :

1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, Авто

Авто – автоусреднение, соответствует 7.

Также степень усреднения можно задать следующим образом :

DataBuff[2] = pow(2, Y),

где Y – число от 0 до 6;

pow(2, Y) – функция возведения в степень, стандартная функция библиотеки Math.

Формирование команды «Задание единиц измерений»:

DataBuff[0] = 'M';

DataBuff[1] = 'G';

DataBuff[2] = X.

Отправка команды :

ComPort1->Write(DataBuff,3),

где X – число от 0 до 2:

0 – dB (относительное значение);

1 – dBm;

2 – W.

Формирование команды «Задание коррекции ослабления»:

DataBuff[0] = 'A';

DataBuff[1] = 'T';

DataBuff[2] = X,

где X – число от 0 до 99.

Формирование команды «Управление подсветкой индикатора»:

DataBuff[0] = 'L';

DataBuff[1] = 'I';

DataBuff[2] = X,

где X – включение подсветки 1, выключение 0.

Формирование команды «Определение состояния измерителя». Эта команда является единственной командой данного типа, на которую предусмотрен ответ. В ответе возвращается информация о частотной

коррекции, компенсации ослабления, степени усреднения, единицах измерений. Длина ответа составляет 6 байт (2 байта зарезервированы).

DataBuff[0] = 'S';

DataBuff[1] = 'T';

DataBuff[2] = 0.

Отправка команды :

ComPort1->Write(DataBuff,3).

Т а б л и ц а 1.6

Параметры COM-порта

Параметры	Значение
Baud rate/Скорость передачи	19200
Data bit/Кол-во информационных бит	8
Stop bit/Кол-во стоповых бит	1
Parity/Наличие проверки на четность	None/Нет
Flow control/Управление потоком	None/Нет

В отчёте по лабораторной работе должны быть приведены: структурная схема измерителя мощности, структура меню, структурная схема измерительной установки для измерения коэффициента шума, результаты измерений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ СВЧ

1. Термины, определения и условные обозначения

Основная задача усилителя СВЧ – обеспечить избирательность, усиление и чувствительность радиоприёмника. Поэтому необходимо, чтобы СВЧ-усилитель имел следующие параметры: низкие собственные шумы, высокое усиление, умеренную избирательность. Полоса частот сужается при использовании резонансных цепей и фильтров, а для снижения шумов используют специально разработанные для уси-

лителей СВЧ-транзисторы. Для уменьшения нелинейных искажений и уменьшения коэффициента шума выбирают линейный режим работы усилителя. Малошумящие СВЧ-усилители работают в режиме А (без отсечки тока). До частоты 3 ГГц используют биполярные или полевые транзисторы. На более высоких частотах применяют полевые транзисторы, изготовленные из арсенида галлия. Обычно полевой транзистор имеет структуру МОП (металл-окисел-полупроводник) с затвором, выполненным в виде контакта Шоттки.

СВЧ-усилители на интегральных микросхемах имеют низкий коэффициент шума и работают от источника постоянного тока. У них есть ряд преимуществ по сравнению с усилителями, реализованными на дискретных (навесных) элементах: микросхема обычно снабжена устройством выключения питания в ждущем режиме; она занимает мало места на печатной плате, не требует внешнего смещения, к тому же её надёжность намного выше надёжности усилителя, реализованного на навесных элементах.

Мощность P_0 , потребляемая усилителем от источника питания, определяется как произведение постоянной составляющей тока I_0 , потребляемого усилителем, и напряжения источника питания U_0 :

$$P_0 = I_0 U_0.$$

Усилитель преобразует мощность P_0 в мощность усиливаемого сигнала. Мерой эффективности преобразования является коэффициент полезного действия усилителя:

$$\eta = (P_{\text{вых}} - P_{\text{вх}}) / P_0.$$

В числителе записана разность мощностей усиливаемого сигнала на выходе и на входе усилителя. Можно сказать, что любой усилитель является, в сущности, преобразователем мощности источника питания в мощность усиливаемого сигнала.

Коэффициент усиления – один из важнейших параметров усилителя – вычисляется по формулам:

$$K \text{ (дБ)} = 10 \lg (P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}),$$

или

$$K \text{ (дБ)} = 20 \lg (U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}),$$

здесь буквой U обозначена амплитуда усиливаемого сигнала. В обеих формулах коэффициент усиления выражается в децибелах.

Ширина полосы пропускания системы связи – разность между самой высокой и самой низкой частотами сигналов, которые могут пройти через канал.

Ширина полосы информационного сигнала – разность между самой высокой и самой низкой частотами информационного сигнала. Чтобы передать по каналу связи все (или хотя бы наиболее существенные) информационные частоты сигнала, полоса пропускания канала связи должна быть равной или большей ширины полосы информационных сигналов.

Информационная ёмкость системы передачи – количество информации, которое можно передать по системе связи. Информационную ёмкость системы обычно представляют скоростью передачи информации, которая выражается в битах в секунду (бит/с). Клод Э. Шеннон показал, что информационная ёмкость I_n системы связи определяется полосой пропускания B и отношением сигнал/шум S/N системы:

$$I_n = B \log_2 (1 + S / N) = 3,32 B \lg (1 + S / N).$$

Чтобы получить такую скорость передачи, необходимо каждый передаваемый символ сообщения кодировать битами.

Частотная характеристика усилителя – зависимость коэффициента усиления от частоты входного сигнала при неизменной мощности входного сигнала.

Амплитудная характеристика усилителя – зависимость выходной мощности от входной. При очень малых уровнях входной мощности сказываются шумы системы передачи.

Электрический шум – любая нежелательная электрическая энергия, которая попадает в полосу пропускания системы передачи. Например, в системе звукозаписи нежелательные электрические сигналы, попадающие в полосу пропускания усилителя, воспринимаются слушателем как акустический шум и мешают воспринимать музыку. Существует большое количество источников шума: атмосферные помехи, радиоизлучение Солнца, дробовой шум, микроволновое фоновое излучение, тепловой шум и др. Из всех видов шумов наибольшее значение имеет тепловой шум. Поскольку он обусловлен быстрым и случайным движением электронов, то присутствует во всех электронных устройствах. Мощность теплового шума N выражается по формуле Джонсона:

$$N = k_B T B,$$

где $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура окружающей среды в кельвинах.

Коэффициент шума усилителя представляет собой отношение двух отношений, а именно отношения сигнал/шум на входе усилителя к отношению сигнал/шум на выходе усилителя:

$$K_{\text{ш}} = (P_{\text{с вх}} / P_{\text{ш вх}}) / (P_{\text{с вых}} / P_{\text{ш вых}}).$$

Физический смысл коэффициента шума показывает, насколько изменится отношение сигнал/шум после прохождения сигнала через усилитель. В иностранной литературе коэффициент шума, выраженный в децибелах, называют шум-фактором:

$$F \text{ (дБ)} = 10 \lg K_{\text{ш}}.$$

В отечественной литературе между коэффициентом шума и шум-фактором различий не делают и выражают тот и другой либо в разгах, либо в децибелах. Чем ближе к нулю $K_{\text{ш}}$, тем выше качество усилителя. К примеру, от величины $K_{\text{ш}}$ зависит предельная дальность определения летательного аппарата в радиолокации. Любой усилитель добавляет к сигналу собственный шум. Уменьшает отношение сигнал/шум любое радиотехническое устройство, а также любой радиоэлемент при прохождении через него сигнала.

Эквивалентная шумовая температура T_z – применяемый вместо коэффициента шума гипотетический (потому что его нельзя измерить) параметр, используемый для оценки качества микроволновых радиоприёмников с низким уровнем шума; показывает величину уменьшения отношения сигнал/шум при прохождении сигнала через приёмник. Эквивалентная шумовая температура, пересчитанная к входу приёмника, выражается через шум-фактор F и температуру начального отсчёта $T_0 = 290 \text{ К}$:

$$T_z \text{ (К)} = T_0 (F - 1).$$

Если известна величина шумовой температуры, то по её величине легко определить величину F .

Динамический диапазон усилителя – выраженное в децибелах отношение максимального входного сигнала, который приводит к перегрузке усилителя и возникновению искажений, и минимального входного сигнала, достаточного для его распознавания на фоне шума.

Калибровочные преобразования – переход от одних значений величин к другим, оставляющим без изменения физически определённые,

наблюдаемые на опыте параметры. Калибровка – правило выбора значений. Калибровочное преобразование может быть задано формулой, таблицей или калибровочной линией. В лабораторной работе используется генератор СВЧ, отсчёт мощности которого выполняется по шкале в децибелах относительно уровня 1 Вт (см. рис. 2.1). Последняя значащая цифра (выделенная красным цветом) отсчётной шкалы 0,1 дБ.

Пределы измерений составляют от -160 дБ до -25 дБ. Для того чтобы пересчитать показания шкалы в милливаттах, воспользуемся формулой

$$10 \lg (P / P_{\text{уровня}}) = K, \text{ дБ.} \quad (2.1)$$

Здесь буквой K обозначен коэффициент ослабления собственного аттенюатора, который находится внутри корпуса генератора. Так как отсчёт калиброванного уровня производится относительно 1 Вт, то выберем

$$P_{\text{уровня}} = 10^3 \text{ мВт.}$$

Исходя из формулы (2.1) можно получить:

$$P = 10^{K/10} \cdot P_{\text{уровня}}. \quad (2.2)$$



Рис. 2.1. Шкала мощности на выходе генератора сигналов Г4-81, проградуированная в децибелах

Пусть, например, показание шкалы $K = -30$ дБ. Тогда мощность на выходе генератора $P = 10^{-30/10} \cdot 10^3$ мВт = 1 мВт. В табл. 2.1 приведены некоторые значения для пересчёта показаний ослабления собственного аттенюатора к значениям мощности на выходе генератора.

Таблица 2.1

**Значения выходной мощности в милливаттах
при разных показаниях отсчётной шкалы**

K , дБ	P , мВт
-160	10^{-13}
-130	10^{-10}
-100	10^{-7}
-70	10^{-4}
-40	10^{-1}

Выбранный логарифмический масштаб позволяет достаточно точно оценить значения выходной мощности в милливаттах в зависимости от значений на шкале генератора в децибеллах, кроме того, с ним удобно работать в большом диапазоне изменения мощности (рис. 2.2).

Измерительная установка для экспериментального исследования транзисторного усилителя СВЧ показана на рис. 2.3. На лабораторном столе установлены (слева направо): осциллограф (сверху), генератор СВЧ типа Г4-81, амперметр (корпус чёрного цвета), измеритель мощности (сверху), источник питания для транзисторного усилителя СВЧ. Сам усилитель имеет вид параллелепипеда светло-синего цвета размером около $95 \times 35 \times 20$ мм. Он располагается перед амперметром чёрного цвета. На фотографии запечатлён момент, когда студентки снимают зависимость коэффициента усиления усилителя от частоты входного сигнала при фиксированном уровне входной мощности.

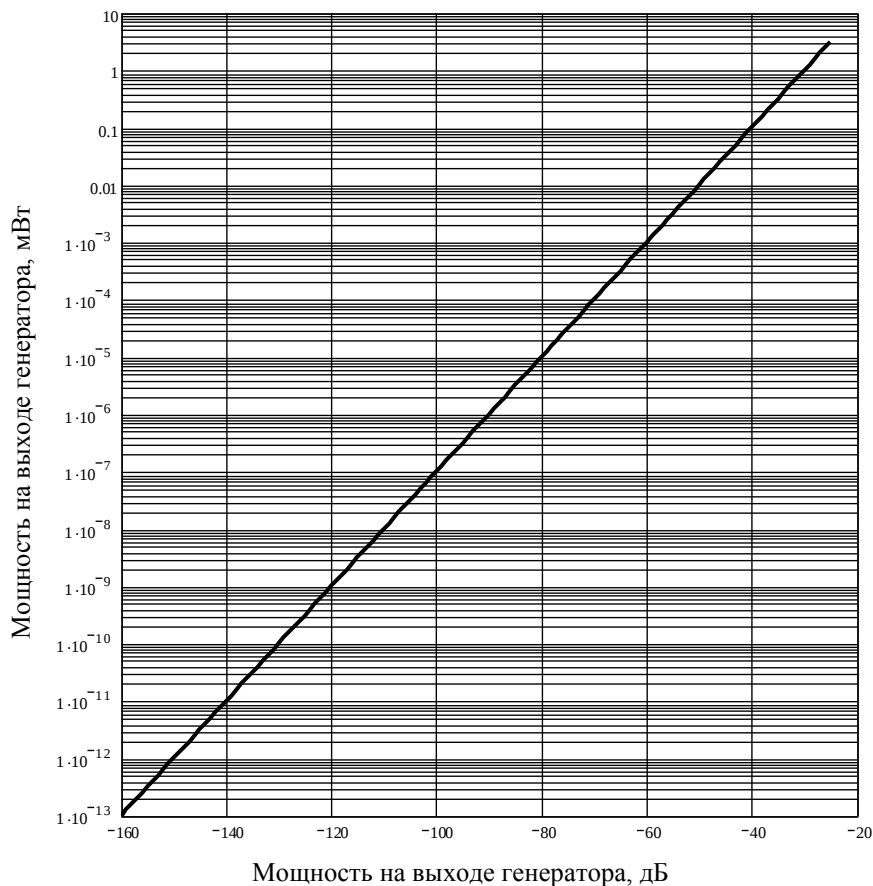


Рис. 2.2. Калибровочная кривая генератора СВЧ

Подготовка к выполнению лабораторной работы заключается в ознакомлении с содержанием работы; повторении теоретического материала, относящегося к работе; выяснении используемых методов измерения. Результаты предварительной подготовки должны быть записаны в тетрадь лабораторных записей.

Выполнение лабораторной работы требует сосредоточенности и внимания. Отсчёты по приборам следует производить со всей возможной аккуратностью, показания приборов записывать в момент производства отсчёта. После того как все необходимые наблюдения и расчёты



Рис. 3.3. Выполнение лабораторной работы «Исследование транзисторного усилителя СВЧ»

выполнены и записаны, их показывают преподавателю, который в случае удовлетворительного выполнения работы делает соответствующую отметку о выполнении работы в своём журнале.

Качество работы экспериментатора зависит от того, насколько правильно записаны полученные им результаты и последующая обработка. Необходимо записывать результаты эксперимента и его статистической обработки в подготовленные заранее таблицы. В первую очередь, следует грубо оценить интервал частот, в которых усилитель усиливает сигналы, а также динамический диапазон усилителя.

Рабочие записи необходимо оформлять в отдельной тетради, так чтобы из них, без дополнительных разъяснений со стороны студента, производившего запись, можно было выяснить все данные, относящиеся к работе

2. Цели работы и домашнее задание

Цели работы:

- знакомство с конструкциями и особенностями работы транзисторов СВЧ;
- изучение принципиальных схем транзисторных усилителей СВЧ;
- приобретение навыков измерения параметров и характеристик;

- исследование зависимости коэффициента усиления от частоты;
- исследование зависимости выходной мощности от входной мощности;
- исследование шумов усилителя.

Домашнее задание. По литературе, указанной в разделе 9, изучить принцип работы, основные характеристики и технические параметры транзисторов СВЧ.

Изучить термины (см. лабораторная работа № 2, раздел 1) и условные обозначения (см. разделы 4 и 5), относящиеся к теме данной лабораторной работы. Изучить схемы лабораторных установок (лабораторная работа № 1).

Привести список условных обозначений и формулы для вычисления следующих параметров: абсолютная и относительная полосы усиления на заданном уровне усиления; коэффициент полезного действия без учета потерь мощности; коэффициент усиления в децибелах и в раз; коэффициент шума; динамический диапазон усилителя.

Предложить схемы измерительных установок для исследования характеристик усилителя и ожидаемый вид этих характеристик. Решить несколько задач по теме лабораторной работы из раздела 3. Подготовить таблицы для записи экспериментальных данных.

Перед выполнением лабораторной работы студент проходит собеседование с преподавателем, в ходе которого он должен доказать, что имеет полное представление о содержании лабораторной работы, знает методы её выполнения.

3. Содержание отчёта

Листы отчёта по лабораторной работе должны быть пронумерованы. Отчёт должен содержать:

- титульный лист, цели работы, перечень исследуемых характеристик, список использованных буквенных обозначений, список использованных графических обозначений приборов и элементов (структурные и принципиальные схемы должны быть оформлены в соответствии с ГОСТом), перечень использованных приборов и устройств, их назначение (условные буквенные обозначения, используемые при написании формул, должны быть такие же, как в лабораторной работе № 2, раздел 1), результаты домашнего задания;
- описание метода измерений и порядок выполнения лабораторной работы;

- экспериментальные данные в виде и таблиц и графиков. Все рисунки и все таблицы пронумеровать и снабдить названиями;
- параметры усилителя, вычисленные по результатам измерений. Значения абсолютной и относительной полос усиления по заданным уровням коэффициента усиления. Значения коэффициента полезного действия. Значения измеренного уровня шума;
- обработка результатов, оценка погрешностей измерений. В отчёте обязательно должны быть выводы. Например, отличие измеренных характеристик и параметров от ожидаемых, объяснение хода характеристик с физической точки зрения и т. п.;
- на последнем листе отчёта привести библиографический список источников информации, использованных при подготовке к лабораторной работе и при оформлении отчёта (учебники, статьи, ресурсы Интернета и т. д.). Список оформить в соответствии с ГОСТом. Пример оформления библиографического описания см. в соответствующем разделе.

4. Варианты лабораторной работы

В а р и а н т 1. Экспериментальное исследование частотной характеристики транзисторного усилителя СВЧ

Использовать компенсационный метод измерений. Генератор стандартных сигналов переводят в режим модуляции меандром. В этом режиме на вход усилителя поступают радиоимпульсы. Вначале необходимо экспериментально оценить диапазон частот, генерируемых генератором, величину шага по частоте, с которым надо выполнять измерения, число точек. Все эти данные указать в отчёте.

С выхода генератора сигнал подают на детектор, а затем – на вход осциллографа. Для удобства индикации сигнала на экране осциллографа установить величину огибающей 2 см. Можно, конечно, устанавливать и другое значение, однако в любом случае это значение надо поддерживать одинаковым во всех частотах. Для этого регулируют выходную мощность генератора.

В а р и а н т 2. Экспериментальное исследование зависимости выходной мощности усилителя от входной мощности

Генератор стандартных сигналов переводят в режим непрерывной генерации. При этом сигнал на выходе генератора – гармонический.

Снять зависимости выходной мощности усилителя от входной мощности на трёх частотах. Уровень входной мощности устанавливать ручкой «Установка выхода» и отсчитывать по значениям в окне над ней. Результаты измерений привести в таблицах, а графики зависимости выходной мощности от входной построить на миллиметровой бумаге и сделать выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА НА ДИОДЕ ГАННА

1. Термины, определения и условные обозначения

Аксиомы метрологии: а) без априорной информации измерения невозможны. Перед тем как приступить к измерениям, необходимо что-то знать об объекте исследования; б) измерения есть не что иное, как сравнение; в) результат измерения без округления является случайным.

Полупроводник – материал, характеризующийся шириной энергетической запрещённой зоны для электронных возбуждений от нуля до 3 эВ. Металлы имеют нулевую ширину запрещённой зоны, а диэлектрики (изоляторы) – больше 3 эВ. Чистый полупроводник при абсолютном нуле не проводит тока.

Основные типы полупроводников: элементарные полупроводники, бинарные соединения, окислы, слоистые полупроводники, органические полупроводники, магнитные полупроводники.

Элементарными полупроводниками являются, например, кремний (Si) и германий (Ge). В их кристаллической структуре каждый атом окружён четырьмя ближайшими атомами, образующими тетраэдр. Иными словами, каждый атом имеет четырёхкратную координацию. Полупроводниками также являются некоторые элементы из V и VI групп периодической таблицы: фосфор (P), сера (S), селен (Se), теллур (Te). Атомы фосфора имеют трёхкратную координацию, атомы S, Se и Te – двукратную координацию.

Бинарные соединения – образуются из элементов III и V групп, например, GaAs. Связь в этих соединениях ионная, обусловленная переносом электронного заряда от атома группы III к атому группы V. Это увеличивает кулоновское взаимодействие между ионами. Другая груп-

па бинарных взаимодействий – соединения II–VI, у которых ширина запрещённой зоны больше 1 эВ. Соединения II–VI с большой шириной запрещённой зоны нашли применение при создании лазеров и дисплеев. Полупроводниковые соединения II–VI с узкой шириной запрещённой зоны используются для изготовления инфракрасных приёмников. Полупроводниками являются также соединения, образующиеся из элементов групп IV и VI, такие как сульфид свинца (PbS) и сульфид олова (SnS).

Оксиды, такие как оксиды меди и оксиды цинка, – хорошие полупроводники. К тому же во многих оксидах меди проявляется эффект высокотемпературной сверхпроводимости.

Слоистые полупроводники имеют слоистую кристаллическую структуру. К ним относятся: иодид свинца (PbI₂), дисульфид молибдена (MoS₂), селенид галлия (GaSe). Внутри слоёв атомы удерживаются ковалентными связями, а между слоями действуют ван-дер-ваальсовы силы. Чтобы изменить взаимодействие между слоями, вводят между ними посторонние атомы. Движение электронов в слоях двумерное.

Ван-дер-ваальсовы силы – силы взаимодействия, возникающие между электрически нейтральными атомами и молекулами; имеют электрическую природу. Эти силы определяют существование жидкостей и молекулярных кристаллов.

Ковалентная связь – связь, осуществляемая в результате обобществления электронной плотности взаимодействующих атомов в пространстве между их ядрами. При этом исходные атомные волновые функции перекрываются и сжимаются, что приводит к увеличению притяжения электронов к ядрам и к уменьшению полной энергии системы. Перекрывание и сжатие волновых функций являются типичными квантовомеханическими эффектами.

Органические полупроводники можно легко получать с заданными свойствами. В этом их преимущество перед неорганическими полупроводниками. Запрещённые зоны органических соединений изменяют, варьируя химическую формулу. Полупроводником является фуллерен (C₆₀). Пластику графита, свёрнутую в трубку диаметром несколько нанометров, называют нанотрубкой. Нанотрубки имеют хорошие перспективы использования в наносекундной электронике. В зависимости от сцепления нанотрубки могут проявлять свойства полупроводников или металлов.

Магнитные полупроводники – наряду с полупроводниковыми свойствами проявляют также магнитные свойства. Магнитные полупро-

водники (например, твёрдые растворы $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ или EuS) содержат магнитные ионы, например, европий (Eu) или марганец (Mn). В зависимости от содержания этих ионов магнитный полупроводник может иметь различные свойства, такие как ферромагнетизм или антиферромагнетизм.

Методы выращивания полупроводников разнообразны и хорошо разработаны. Чистые монокристаллы кремния выращивают в виде слитков диаметром 30 см и больше. Применяются следующие основные методы выращивания: метод Чохральского, метод Бриджмена, химическая газофазная эпитаксия, жидкофазная эпитаксия, молекулярно-пучковая эпитаксия.

Варикап – полупроводниковый диод, в котором используется зависимость ёмкости от обратного напряжения. Применяется в качестве элемента с электрически управляемой ёмкостью.

Группа – одно из самых основных понятий современной математики. Непустое множество G с одной бинарной операцией называют группой, если выполнены условия: операция в G ассоциативна, в G выполнима обратная операция. Свойства электронов в твёрдом теле многочисленны, а задача моделирования процессов в твёрдом теле очень сложна. Для решения волновых уравнений для электронов используют теорию групп.

Эффект Ганна обусловлен междолинным переходом электронов проводимости в полупроводнике типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. Если напряжение на кристалле однородного полупроводника достигает пороговой величины, то в этом образце самопроизвольно возникают колебания. Зона проводимости полупроводника $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ состоит из нескольких подзон или долин (рис. 3.1). При пороговом напряжении происходит междолинный переход. Электроны проводимости переходят из нижней долины в верхнюю.

Запрещённые зоны – области значений энергии, в которых ни одно подобное волне электронное энергетическое состояние не является разрешённым. Запрещённые зоны возникают в результате взаимодействия волн электронов проводимости с ионными остовами кристаллов.

2. Цели работы и домашнее задание

Цели лабораторной работы: изучение условных обозначений приборов и устройств СВЧ (см. разделы 4 и 5), знакомство с конструкциями генераторов на основе диодов Ганна, изучение схем измерительных

установок, изучение правил эксплуатации измерителей мощности и волномеров, приобретение навыков экспериментального исследования твердотельных приборов СВЧ, измерение характеристик и определение параметров генераторов. Исследуемые характеристики: вольт-амперные характеристики диода Ганна (зависимости постоянной составляющей тока от напряжения), снятые при нескольких параметрах объёмного резонатора; зависимости выходной мощности и частоты генерации от длины резонатора.

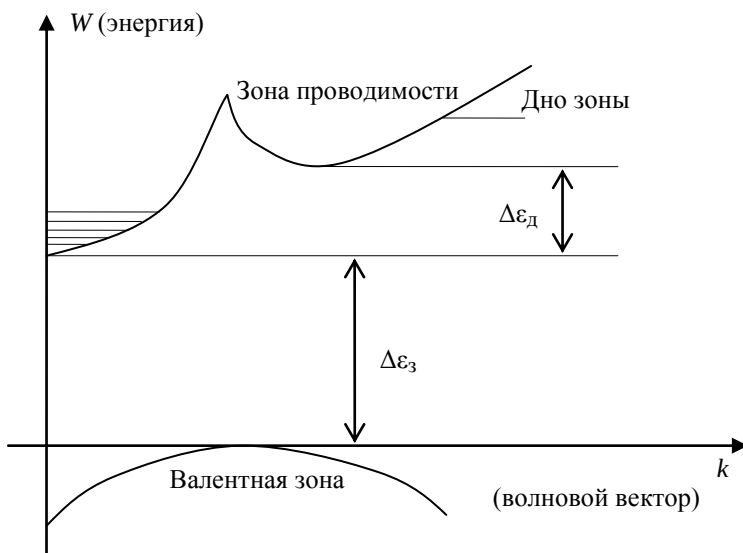


Рис. 3.1. Энергетическая диаграмма полупроводника типа $A^{III}B^V$.

По литературе, указанной в соответствующем разделе, изучить принцип работы и основные характеристики диода Ганна. На листах формата А4 оформить титульный лист отчёта; перечислить цели работы и привести ожидаемый вид исследуемых характеристик; изобразить схему измерительной установки; подготовить таблицы для записи экспериментальных данных и расчетов; привести формулы для вычисления потребляемой генератором мощности от источника питания и коэффициента полезного действия. Решить задачи из раздела 2 – полупроводниковые приборы СВЧ, относящиеся к теме лабораторной работы.

3. Содержание отчёта

Отчёт включает в себя:

- цели лабораторной работы;
- перечень использованных приборов с указанием типа и кратким описанием;
- схема измерительной установки и её описание;
- описание методов экспериментального исследования;
- экспериментальные зависимости в виде таблиц и графиков;
- диапазон механической (электронной) перестройки частоты генератора (в абсолютных и относительных единицах);
- изменение мощности в диапазоне;
- максимальный коэффициент полезного действия генератора, пределы изменения КПД в процессе механической перестройки;
- значение максимальной крутизны механической перестройки частоты $\Delta f/\Delta I$ [в МГц/мм], график изменения крутизны $\Delta f/\Delta I = F(\alpha_i)$ в процессе механической перестройки;
- диапазон изменения напряжения питания (в абсолютных и относительных единицах);
- сопротивление диода Ганна в слабом поле;
- анализ полученных результатов, выводы.

4. Варианты лабораторной работы

В а р и а н т 1. Экспериментальное исследование генератора на основе диода Ганна и отрезка стандартного прямоугольного волновода сечением 23×10 мм

Дополнительно к перечисленным выше целям лабораторной работы предлагается исследовать вопрос лучшего согласования низкого импеданса диода Ганна с волновым сопротивлением прямоугольного волновода. Согласование позволит увеличить выходную мощность, а также обеспечит более широкую полосу перестройки генератора.

В а р и а н т 2. Экспериментальное исследование генератора на основе диода Ганна с электрической перестройкой частоты

Генераторы с электрической перестройкой частоты используют в качестве свип-генераторов для панорамных измерителей КСВ, автома-

тических анализаторов цепей СВЧ, гетеродинов в приёмниках СВЧ с быстрой перестройкой частоты.

Дополнительно к перечисленным выше пунктам содержания лабораторной работы: снять зависимость затухания аттенюатора от показателя его шкалы, а также зависимости выходной мощности и частоты от напряжения смещения на варикапе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА

1. Термины, определения и условные обозначения

Лазер – оптический квантовый прибор (усилитель или автогенератор), принцип действия которого основан на использовании индуцированного излучения. В лазерах внутренняя энергия частиц преобразуется в энергию колебаний, когерентных с внешним электромагнитным излучением. Название происходит от сокращения до первых букв английской фразы: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

Мазер – квантовый прибор, предназначенный для усиления или генерирования электромагнитных колебаний СВЧ-диапазона. Слово составлено из начальных букв той же фразы, в которой слово *light* (свет) заменено словом *microwave* (микроволна).

Ирразер – квантовый генератор или усилитель инфракрасного ($\lambda = 0,75...100$ мкм) диапазона. Слово произошло от той же английской фразы, в которой надо первым поставить слово *infrared* – инфракрасный.

Сазер – ультразвуковой прибор (*saser, sound amplification by stimulated emission of radiation*). Конструктивно сазер представляет собой чередование тонких пластин из полупроводниковых материалов. На верхний полупроводниковый слой направляют пучок фотонов. Электроны вещества возбуждаются, а затем, теряя энергию, испускают фононы – квазичастицы, кванты колебательного движения. Отражаясь от границ раздела слоев, повторно взаимодействуя с электронами и распространяясь по структуре, фононы достигают нижнего слоя; на выходе прибора получают сфокусированное ультразвуковое (гигагерцевое или терагерцевое) излучение. Мощный источник когерентных фоно-

нов – хороший инструмент для бесконтактного исследования объектов, имеющих размеры в несколько нанометров.

Индукцированное (вынужденное, стимулированное) излучение – испускание фотона возбуждённым физическим объектом (атом, ион, молекула и т. д.) под влиянием внешнего по отношению к этому объекту электромагнитного поля резонансной частоты. Направление распространения, частота и поляризация индуцированного излучения и внешнего излучения одинаковы. Процесс, обратный индуцированному излучению, есть поглощение фотона физическим объектом с переходом его в состояние с большей энергией.

Населённость N_n уровня – количество частиц в единице объема, находящихся в состоянии с энергией W_n . Вероятность индуцированных переходов отлична от нуля только при наличии внешнего поля резонансной частоты, энергия кванта которого удовлетворяет постулату Бора $h\nu = \hbar\omega = W_n - W_m$.

Количество вынужденных переходов в единицу времени в единице объёма с выделением энергии равно $B\rho_\nu N_n$. В единице объема выделяется мощность $B\rho_\nu N_n h\nu$. Здесь $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, B ($\text{м}^3 / \text{Дж} \cdot \text{с}^2$) – коэффициент Эйнштейна для индуцированных переходов; ρ_ν (Дж / ($\text{м}^3 \cdot \text{Гц}$)) – объемная спектральная плотность энергии, т. е. плотность энергии поля в единичном спектральном интервале.

Поглощаемая в единице объёма мощность есть $B\rho_\nu N_m h\nu$. Результирующая мощность взаимодействия поля и вещества равна $B\rho_\nu h\nu (N_n - N_m)$. В объеме, имеющем единичную площадь основания и высоту dx , величина выделяемой мощности равна мощности, переносимой через единичную площадь: $dp = B\rho_\nu h\nu (N_n - N_m) dx$.

Плотность мощности p (интенсивность излучения) связана с объёмной спектральной плотностью энергии ρ_ν и групповой скоростью электромагнитного поля v (м/с) соотношением p ($\text{Вт}/\text{м}^2$) = $\rho_\nu v$, поэтому $dp = pB h\nu (N_n - N_m) v^{-1} dx$.

Коэффициент квантового усиления – показатель увеличения мощности излучения на единицу длины α (м^{-1}) = $Bh\nu (N_n - N_m)/v$. Следовательно, плотность мощности изменяется с расстоянием по закону $p(x) = p(0) e^{\alpha x}$. В реальных веществах имеются потери энергии из-за

рассеяния и нерезонансного поглощения. Обозначая коэффициент потерь как β , получим $p(x) = p(0) e^{(\alpha-\beta)x}$.

Инверсия населенностей – состояние вещества, при котором населенность верхнего уровня больше населенности нижнего уровня.

Баланс амплитуд для лазера-автогенератора выполнен тогда, когда энергия взаимодействия электромагнитного поля и вещества восполняет потери. Математически это условие записывают в комплексном виде:

$$e^{j\frac{2\pi}{\lambda_q}l} e^{2(\alpha-\beta)l} \dot{\Gamma}_1 \dot{\Gamma}_2 (1 - \beta_d) = 1. \quad (4.1)$$

Здесь j – мнимая единица; l – длина оптического резонатора (предполагается, что резонатор полностью заполнен веществом); $\dot{\Gamma}_1$ и $\dot{\Gamma}_2$ – комплексные коэффициенты отражения двух зеркал, образующих резонатор Фабри–Перо; β_d – коэффициент дифракционных потерь на зеркалах.

Поляризация электромагнитной волны – нарушение осевой симметрии поперечной электромагнитной волны относительно направления распространения этой волны. Волна называется поляризованной, если в каждой точке пространства направление вектора электрического поля остаётся неизменным или изменяется с течением времени по определённому закону. Различают плоско-поляризованные (линейно-поляризованные), циркулярно-поляризованные (круговая поляризация) и эллиптически-поляризованные волны. В этих трёх случаях конец вектора напряжённости электрического поля описывает с течением времени соответственно прямую линию, окружность и эллипс. Круговая и линейная поляризации являются частными случаями эллиптической поляризации. Две ортогональные линейно поляризованные волны, имеющие определённую амплитуду и фазу, образуют эллиптически поляризованную волну. В продольной волне поляризация отсутствует, так как в такой волне распространение возмущения совпадает с направлением распространения.

Закон Э. Л. Малюса – зависимость интенсивности I линейно-поляризованной электромагнитной волны после её прохождения через поляризатор от угла $\Delta\varphi$ между плоскостью поляризации падающей волны и плоскостью поляризации поляризатора:

$$I = I_0 \cos^2(\Delta\varphi).$$

Здесь I_0 – интенсивность падающей на поляризатор волны, I – интенсивность волны, прошедшей через поляризатор. По закону Малюса рассчитывается интенсивность проходящего света в поляризационных приборах. Потери на отражение могут зависеть от угла $\Delta\varphi$. Однако закон Малюса их не учитывает.

Когерентные волны – волны, имеющие одинаковую частоту, не зависящую от времени разность фаз.

Интерференция волн – сложение когерентных волн, в результате происходит их усиление в одних точках пространства и ослабление в других.

Дифракция волн – нарушение прямолинейности распространения волн и сопровождающая его интерференция. В общем случае под дифракцией понимаются явления, наблюдающиеся при прохождении волн через среды с резко выраженными неоднородностями. Строгое исследование дифракции электромагнитных волн выполняют, решая уравнения Максвелла при соответствующих граничных условиях. Дифракция происходит как с поперечными, так и с продольными волнами.

Принцип Гюйгенса–Френеля – приближённый метод анализа дифракционных явлений. В частности, метод определения положения фронта волны в любой момент времени $t + \Delta t$ по известному положению фронта в некоторый предшествующий момент t . Согласно принципу Гюйгенса–Френеля, все точки фронта волны излучают (в направлениях, составляющих острые углы с внешней нормалью к фронту волны) когерентные вторичные волны, которые интерферируют между собой. Фронт волны в момент времени $t + \Delta t$ определяется интерференцией всех вторичных волн.

Дифракция лазерного излучения на узкой щели лежит в основе метода, позволяющего измерить длину волны по интерференционной картине. Пусть излучение лазера падает нормально на узкую щель (рис. 4.1). Ширина щели равна a , на расстоянии L_6 от щели расположен экран. Для объяснения физических явлений воспользуемся принципом Гюйгенса–Френеля. Излучение лазера является плоскопараллельной волной. Фронт волны совпадает с площадью щели, поэтому щель можно представить множеством одинаковых параллельных полосок, каждая из которых излучает элементарные волны с одинаковыми фазами и амплитудами.

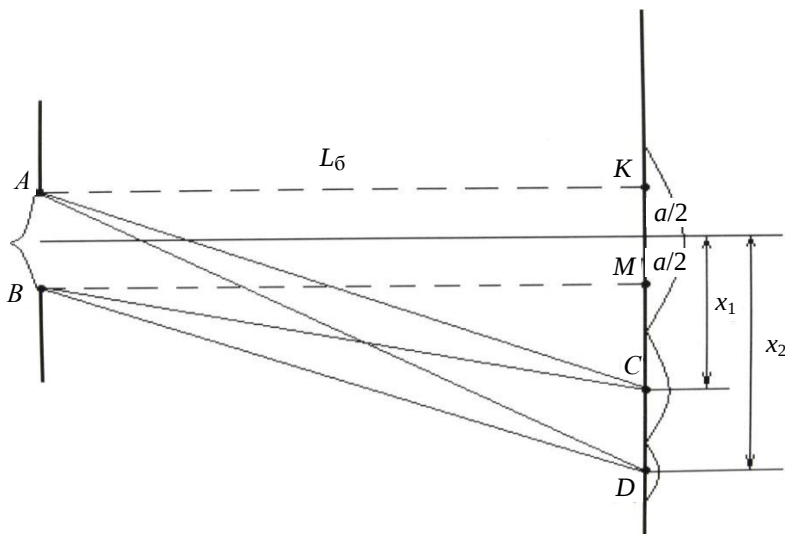


Рис. 4.1. Дифракция на щели. Луч лазера падает слева на щель AB

Для некоторых направлений распространения разность хода элементарных волн такова, что волны при интерференции либо усиливаются (усиливающая интерференция), либо ослабляются (гасящая интерференция) и на экране образуются дифракционные максимумы (свет) и минимумы (темнота). Интерференционная картина перпендикулярна щели, излучение распространяется в области тени. Для любой точки на экране можно построить векторную диаграмму, иллюстрирующую вклад элементарных волн и результирующий вектор. Свет на экране будет в том случае, когда разность хода крайних элементарных волн будет равна половине длины волны излучения λ .

Распределение интенсивности света на экране описывается формулой

$$I_{\varphi} = I_0 \frac{\sin^2 \left(\frac{a\pi}{\lambda} \sin \varphi \right)}{\left(\frac{a\pi}{\lambda} \sin \varphi \right)^2}.$$

В этой формуле: φ – угол, определяющий направление распространения волны, I_0 – интенсивность волны в центральном (нулевом) макси-

муме. Как следует из этой формулы, интенсивность вторичных максимумов резко убывает.

Определение длины волны излучения по расстоянию от центра дифракционной картины до максимумов. Обозначим через x_1 и x_2 расстояния от центра экрана до первого и второго максимумов дифракционной картины соответственно. Из треугольника AKC (рис. 4.1) следует:

$$AC^2 = L_0^2 + (a/2 + x_1)^2, \quad (4.2)$$

а из треугольника BMC :

$$BC^2 = L_0^2 + (x_1 - a/2)^2. \quad (4.3)$$

Вычитая (4.3) из (4.2) и заменяя сумму слагаемых AC и BC на приближённую величину $2L_0$, после простых преобразований получим равенство:

$$AC - BC = a x_1 / L_0.$$

Но разность хода элементарных волн, идущих от элементарных зон вблизи краёв A и B щели, равна нечётному числу $(2m + 1)$ полуволн, поскольку точки пересечения линий AC и BC с экраном определяют ширину первого максимума света. Следовательно,

$$(2m + 1) \lambda / 2 = a x_1 / L_0. \quad (4.4)$$

Здесь m (достаточно большое число) – целое число волн, укладывающихся на длине отрезков AC и BC . Для второго максимума разность хода между элементарными волнами на длину волны больше на величину λ , поэтому из треугольников AKD и $БМД$ следует соотношение:

$$(2m + 1) \lambda / 2 + \lambda = a x_2 / L_0. \quad (4.5)$$

Расстояние между вторым и первым минимумами обозначим как $x = x_2 - x_1$. Исключив из (4.4) и (4.5) величину m , получим формулу

$$\lambda = ax / L_0$$

для определения длины волны по измеренному расстоянию между соседними максимумами освещённости.

2. Цели работы и домашнее задание

Цели работы. Знакомство с конструкциями, а также особенностями работы лазеров и мазеров различных типов. Изучение измерительных приборов и элементов измерительной установки. Изучение правил безопасной работы с лазерами. Приобретение навыков экспериментального исследования параметров и характеристик лазеров. Измерение параметров лазерного излучения. Изучение условных обозначений квантовых приборов и схем включения лазеров в радиотехнические устройства.

Домашнее задание. Ознакомиться с основными терминами и определениями (см. раздел 4.1 настоящего учебного пособия). Предложить методы измерений, которые будут использованы при выполнении экспериментальной части лабораторной работы. Предложить структурные схемы лабораторной установки и перечень необходимых для эксперимента приборов и приспособлений. Изобразить качественный вид исследуемой зависимости мощности, принимаемой фотодиодом, от угла поворота анализатора (поляризационная характеристика). Изобразить качественный вид диаграммы направленности лазера. Решить задачи из главы 3, разделы 8 и 9, относящиеся к теме лабораторной работы.

3. Содержание отчёта

- Цели лабораторной работы.
- Подробное описание методов измерений.
- Перечень с указанием назначения используемых приборов и приспособлений.
- Описание работы приборов и приспособлений.
- Выбор и обоснование структурных схем измерительной установки.
- Результаты измерений в виде таблиц и графиков.
- Рисунки интерференционных картин при дифракции лазерного излучения на щели.
- Расчёт параметров излучения по результатам измерений.
- Оценка погрешностей измерений и сравнение полученных данных с ожидаемыми параметрами и зависимостями.
- Анализ полученных результатов и выводы по результатам экспериментального исследования.
- Список использованной литературы и ресурсов Интернета.

4. Варианты лабораторной работы

В а р и а н т 1. Экспериментальное исследование ватт-амперной характеристики полупроводникового лазера и поляризации лазерного излучения

Прежде всего надо определить коэффициент преобразования $K_{\text{пр}}$ измерителя мощности излучения. Для этого установить максимальную мощность излучения P_{max} , измерить соответствующее ей максимальное показание вольтметра u_{max} и воспользоваться формулой:

$$K_{\text{пр}} = P_{\text{max}} / u_{\text{max}}.$$

Принять $P_{\text{max}} = 2$ мВт. При измерениях следить, чтобы всегда было выполнено условие: $u \leq 3,5$ В. В противном случае операционный усилитель измерителя будет работать в нелинейном режиме и резко возрастёт погрешность измерений. Чтобы кристалл лазера не перегревался, режим максимальной мощности надо поддерживать непродолжительное время. При выполнении перечисленных условий мощность излучения пропорциональна напряжению u .

Изменяя ток накачки, снять зависимость мощности излучения от тока накачки (ватт-амперную характеристику лазера). Повторить измерение ватт-амперной характеристики через 20 мин, с тем чтобы проверить, влияет ли температура на вид амплитудной характеристики. Оценить величину порогового тока.

По результатам измерений построить зависимость КПД лазера от тока накачки. При расчётах напряжение питания на лазере принимать равным одному вольту.

Исследование поляризационных свойств излучения полупроводникового лазера можно выполнить, используя поляризатор. Необходимо снять зависимость выходной мощности излучения от угла поворота поляризационного фильтра в пределах от нуля до 360° . Поворачивая фильтр с шагом 10° и фиксируя угол поворота с шагом 10° , измерять значения мощности излучения на выходе фильтра.

Полученная экспериментальным путем поляризационная характеристика позволяет судить о поляризации лазерного излучения. Нормированную относительно максимального значения поляризационную

характеристику изобразить на одном графике с законом Малюса. Оценить среднее отклонение поляризационной характеристики от него. Сделать выводы.

В а р и а н т 2. Измерение длины волны и частоты лазерного излучения

Сравнительно просто длину волны излучения можно измерить по дифракционной картине, полученной при прохождении луча через узкую щель в металлической пластине (рис. 4.2). Ширина щели должна быть известной.



Рис. 4.2. Структурная схема измерительной установки для измерения длины волны излучения

На экране, которым может служить лист миллиметровой бумаги, получить дифракционную картину. В отчёте привести рисунки дифракционной картины с указанием расстояний между минимумами освещённости и их численные значения. По результатам измерений рассчитать длину волны излучения и оценить погрешность.

В а р и а н т 3. Изучение характеристик лазерного модуля

Лазерный модуль предназначен для использования в закрытых помещениях при климатических условиях: интервал температур от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$; относительная влажность воздуха 80 % при температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$; атмосферное давление от 650 до 800 мм рт. ст. По степени опасности генерируемого излучения лазерный модуль относится к 2 классу по СН 5804-91. Прибор сертифицирован. Основные технические данные лазерного модуля приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Основные параметры лазерного модуля

Диаметр пучка на расстоянии 10 м, мм	4
Диаметр пучка на расстоянии 20 м, мм	8
Напряжение питания, В	2,5...4,5
Номинальный ток, мА	20...70
Потребляемая мощность, мВт	<200

Лазерный модуль генерирует узкий когерентный пучок и применяется для научно-исследовательских и демонстрационных целей. Может использоваться так же, как встраиваемый элемент в технологических установках и оптоэлектронных приборах.

Измерение интенсивности лазерного излучения выполняется с помощью фотоприёмников, собранных из современных радиодеталей. Ниже рассматриваются два варианта таких приёмников.

Измеритель лазерного излучения на основе фотодиода с встроенным операционным усилителем. Прежде чем выполнять измерения, необходимо тщательно изучить устройство и принцип действия операционного усилителя, ознакомиться с характеристиками фотодиода с встроенным операционным усилителем.

Измеритель излучения на основе фототранзистора и операционного усилителя. В качестве прибора, измеряющего выходной сигнал измерителя, использовать цифровой тестер. Фотоприёмник откалибровать в значениях освещённости. Освещённость – это световой поток, приходящийся на единицу освещаемой поверхности, выражается в люксах (лк). Люкс – освещённость поверхности площадью 1 м^2 при световом потоке падающего на неё излучения, равном 1 люмену (лм). При подготовке к лабораторной работе изучить устройство и характеристики фототранзистора, составить принципиальную схему измерителя мощности. Предложить метод калибровки освещённости фототранзистора и метод проверки линейности

Экспериментальная часть лабораторной работы. Предложить структурную схему установки для измерения освещённости. После обсуждения и уточнения структурной схемы измерить освещённость.

По данным, приведенным в табл. 4.1, вычислить *расходимость луча* и сравнить полученное значение с теоретической величиной. Расходимость (расхождение) лазерного излучения является количественной мерой одного из его основных свойств – направленности. Излучение лазера узконаправленно. Расходимость излучения – это плоский или телесный угол при вершине конуса, внутри которого излучается заданная величина (заданный уровень) мощности. Свойства излучения показывают обычно в виде зависимости нормированной амплитуды напряжённости электрического поля от направления при фиксированном расстоянии от излучателя. График такой зависимости называют диаграммой направленности. Если предположить, что расходимость лазерного излучения ограничивается дифракцией на зеркалах оптического резонатора, то угол расхождения

$$\theta = 1,22 \lambda / d.$$

Здесь λ – длина волны излучения, d – диаметр излучающей поверхности.

Расходимость лазеров превосходит теоретическую величину. Причиной является то, что не вся поверхность лазера излучает одинаково по фазе и амплитуде. Расходимость в сильной степени зависит от материала активной среды. Так, расходимость газовых лазеров в несколько раз меньше расходимости твердотельных лазеров. В твёрдых телах имеются неоднородности и внутренние напряжённости, которые влияют на распространение фотонов в активной среде, тогда как газ представляет собой более однородную среду. Тем не менее лазеры обладают значительно более высокой направленностью, чем обычные антенны.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ С МОДЕЛЯМИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1. Термины, определения и условные обозначения

Математическая модель – приближённое описание какого-либо объекта или процесса с помощью математической символики: формулы или уравнения, наборы правил в математической форме. Издавна в математике, механике, физике, радиоэлектронике и других точных

науках естествознания и техники для описания изучаемых ими явлений использовались математические модели. Исследование математической модели позволяет исследовать свойства изучаемого процесса.

Математическое моделирование – изучение явлений с помощью математических моделей. Метод математического моделирования позволяет проектировать новые устройства и системы, работающие в оптимальных режимах. Нередко математическое моделирование является единственным методом изучения явлений.

Вычислительный эксперимент – информационная технология, предназначенная для исследования различных систем. Основоположник вычислительного эксперимента – академик А.А. Самарский. Сущность вычислительного эксперимента кратко выражается тремя словами: «модель – алгоритм – программа». Вычислительный эксперимент часто применяется при изучении явлений, когда натурный эксперимент оказывается слишком дорогим и сложным либо вообще невозможным, как например, изучение астрофизических явлений. В отличие от натуральных экспериментальных исследований вычислительный эксперимент позволяет накапливать результаты, полученные при исследовании конкретного круга задач, а затем быстро применять их к решению задач в совершенно других областях. Изменяется только физический смысл величин, входящих в это уравнение.

MatLab (от слов **Matrix Laboratory** – матричная лаборатория) – компьютерная программа, предназначенная для решения математических и инженерных задач. Состоит из ядра и большого количества пакетов расширения. Ядро программы может работать в режиме калькулятора и в программном режиме. В обоих режимах MatLab может выполнять арифметические и логические операции. Может вычислять специальные, векторные и матричные функции. Работает с комплексными переменными, строит графики и диаграммы. В программном режиме MatLab решает задачи, используя программы, составленные разработчиками или пользователями. Библиотеку программ можно дополнять файлами для решения своих задач.

Simulink – программа визуального моделирования, работающая под управлением ядра программы MatLab.

S-модель – модель исследуемого объекта, составленная в виде блок-схемы на мониторе компьютера. Моделирующие блоки, являющиеся моделями элементов объекта, переносятся в предварительно открытый файл модели. Каждый блок имеет своё графическое начертание, графические или математические символы, параметры.

2. Цели работы и домашнее задание

Цели работы. Формирование у студентов понимания физических принципов построения и работы различных микроволновых и квантовых приборов, широко используемых в современных системах передачи информации. Самостоятельное изучение и повторение студентами материала дисциплин «Математика», «Физика», «Основы теории цепей», «Информатика». Формирование общенаучных и инструментальных компетенций: способность использовать фундаментальные законы в профессиональной деятельности и способность самостоятельно работать с современными информационными технологиями.

Домашнее задание. Ознакомиться с основными используемыми терминами и определениями, а также с теоретическими сведениями к вариантам лабораторной работы. Повторить соответствующие разделы перечисленных выше дисциплин. Вспомнить (или изучить самостоятельно) основные принципы вычислений, структурного моделирования и программирования в системе MatLab. Самостоятельно приобрести простейшие навыки работы с этой системой, решив несколько простых задач на компьютере.

Решить задачи из главы 3, относящиеся к темам лабораторной работы.

3. Содержание отчёта

- Цели лабораторной работы.
- Описание поставленной задачи.
- Подробное описание использованных методов вычислений.
- Краткое описание возможностей системы MatLab.
- Перечень использованных моделирующих блоков.
- Схемы моделей, созданные в Simulink и преобразованные в текстовый редактор Microsoft Word.
- Результаты вычислительного эксперимента в виде таблиц и графиков.
- Оценка погрешностей моделирования и сравнение полученных данных с ожидаемыми параметрами и зависимостями.
- Анализ полученных результатов и выводы по результатам исследования.
- Список использованной литературы и ресурсов Интернета.

Отчёт по лабораторной работе следует оформить в текстовом редакторе Microsoft Word. Схемы моделей и результаты моделирования следует помещать в определённых местах текста отчёта. Чтобы схема модели оказалась в нужном месте текста, перед вставкой объекта надо щёлкнуть левой клавишей мыши в точке, где будет находиться левый верхний угол модели.

Вставленный в документ объект редактировать, уменьшая область для графического объекта, изменяя масштаб схемы модели путём перетаскивания чёрных меток на рамке выделения, изменяя место модели на листе и т. п.

4. Варианты лабораторной работы

В а р и а н т 1. Модель электрической цепи СВЧ, подключенной параллельно электровакуумному зазору с плоскими электродами

Цель лабораторной работы: ознакомление с методом математического моделирования электровакуумных приборов СВЧ; приобретение навыков работы с программой MatLab.

В данном разделе разработана модель электронной цепи, в которой при определенных условиях могут возникать колебания, обусловленные инерционностью заряда и реактивными элементами цепи. Модель позволяет получить аналитическое решение, построить зависимости, используя систему MatLab, и сделать заключения о физических процессах в цепи.

Пролёт заряженных частиц через зазоры, образованные плоскопараллельными сеточными электродами, имеет место в электровакуумных приборах, автогенераторах и усилителях сверхвысоких частот, накопителях и коммутаторах энергии.

Рассмотрим одномерный случай, когда в зазор (рис. 5.1, *а*) влетает слой электронов с начальной скоростью v_0 . Параллельно зазору подключено сопротивление R . На схеме замещения (рис. 5.1, *б*) зазор представлен нелинейным элементом N и идеальным ключом K , замкнутым в течение того интервала времени, когда в зазоре находится заряд. При этом через ключ K и элемент N протекает наведенный ток:

$$i_n(t) = q v(t) / d.$$

Напряжение $u(t)$ на зазоре определяется величиной полного тока $i(t)$, равного сумме емкостного и наведенного токов, протекающих через R . Скорость заряда определим из уравнения движения электрона:

$$v(t) = v_0 - \frac{eR}{md} \int_{t_0}^t i(s) ds.$$

Согласно первому закону Кирхгофа, запишем интегро-дифференциальное уравнение, описывающее процессы в цепи (см. рис. 5.1, б)

$$RC \frac{di}{dt} + i + \frac{qeR}{md^2} \int_{t_0}^t i ds = \frac{qv_0}{d}, \quad i(t_0) = -\frac{u(t_0)}{R}. \quad (5.1)$$

Из уравнения видно, что полный ток в цепи в общем случае имеет колебательный характер, несмотря на то, что в цепи отсутствует индуктивность. Понятно, что и напряжение на зазоре, скорость и координата электронов, наведенные на электродах заряды также совершают затухающие колебания.

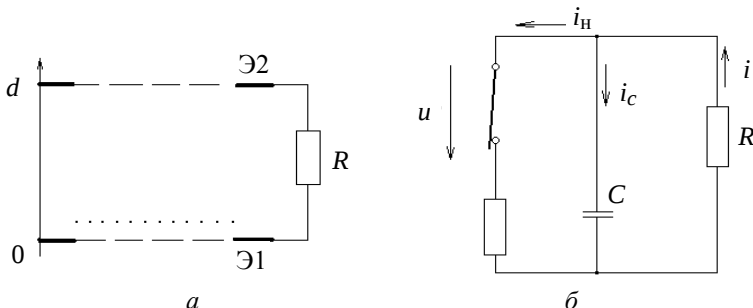


Рис. 5.1. Пролёт тонкого слоя заряженных частиц через зазор (а) и эквивалентная схема цепи (б)

Зададим характерные значения: скорости v_0 , заряда q , тока qv_0 / d , расстояния d , напряжения $qv_0 R/d$, времени RC . Переходя к безразмерным величинам, из (5.1) получим обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{di}{dt} + ki = 0, \quad i_0 = -u_0, \quad \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = 1 + u_0. \quad (5.2)$$

Критерием подобия является безразмерная величина $K = qeR^2C / md^2$. Задачу можно свести также к одному из уравнений:

$$\frac{d^2v}{dt^2} + \frac{dv}{dt} + Kv = 0, v(t_0) = 1, \left. \frac{dv}{dt} \right|_{t=t_0} = Ku_0 \quad (5.3)$$

– относительно безразмерной скорости
или

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \frac{du}{dt} + Ku = 0, u(t_0) = u_0, \left. \frac{du}{dt} \right|_{t=0} = -1 - u_0 \quad (5.4)$$

– относительно напряжения на зазоре.

Достаточно решить какое-либо из уравнений (5.2) – (5.4), чтобы найти безразмерные зависимости, характеризующие процессы. Справедливы следующие соотношения:

$$u(t) = -i(t), \quad \frac{dv}{dt} = Ku(t), \quad i_H(t) = v(t), \quad i_C(t) = i(t) - i_H(t).$$

Любое из уравнений (5.2) – (5.4) можно записать символически в виде:

$$(D^2 + D + K)y = 0,$$

где D – оператор дифференцирования, $Dy = dy / dt$.

Общее решение определяется корнями алгебраического уравнения $r^2 + r + K = 0$. В свою очередь, корни уравнения зависят от величины критерия подобия:

$$r_{1,2} = -0,5 \pm \sqrt{0,25 - K}.$$

Возможны три случая:

- при $K < 0,25$ – корни вещественные и различные;
- при $K = 0,25$ – корни одинаковые, $r_1 = r_2 = -0,5$;
- при $K > 0,25$ – корни комплексно-сопряжённые.

Соответственно решениями задачи Коши (5.3) являются зависимости нормированной скорости от нормированного к величине RC времени:

$$\begin{aligned}
 v(t) &= \left[Ku_0 - r_2 e^{r_1 t} - Ku_0 - r_1 e^{r_2 t} \right] / (r_1 - r_2), \quad K < 0,25; \\
 v(t) &= [1 + (0,5 + u_0 / 4)] t e^{-0,5t}, \quad K = 0,25; \\
 v(t) &= \left[\cos \sqrt{K - 0,25} t + 0,5 + Ku_0 \sin \sqrt{K - 0,25} t / \sqrt{K - 0,25} \right] e^{-0,5t}, \\
 &\quad K > 0,25.
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

По найденным зависимостям $v(t)$ найдем нормированное на зазоре напряжение:

$$\begin{aligned}
 u(t) &= \left[r_1 Ku_0 - r_2 e^{r_1 t} - r_2 Ku_0 - r_1 e^{r_2 t} \right] / (r_1 - r_2)K, \quad K < 0,25; \\
 u(t) &= [u_0 - (1 + u_0 / 2)] e^{-0,5t}, \quad K = 0,25; \\
 u(t) &= \left[u_0 \cos \sqrt{K - 0,25} t - 1 + u_0 / 2 \sin \sqrt{K - 0,25} t / \sqrt{K - 0,25} \right] e^{-0,5t}, \\
 &\quad K > 0,25.
 \end{aligned}$$

При движении заряда q от Э1 к Э2 наведенный заряд на электроде Э1 уменьшается, а на электроде Э2 увеличивается. Через сопротивление R протекает наведенный ток, величина которого тем больше, чем больше заряд q и чем меньше межэлектродное расстояние d .

Наведенный ток $i_H(t)$ протекает через сопротивление R в течение интервала времени, когда заряд находится в зазоре. Нормированную к d координату $x(t)$ заряда определим из выражения для скорости

$$x(t) = k \int_0^t v(s) ds, \tag{5.6}$$

где $k = v_0 T / d$ – временной параметр, равный отношению постоянной времени цепи к времени пролета заряда между электродами.

Воспользовавшись выражениями для $v(t)$, получим формулу для координаты заряда в функции безразмерного времени:

$$x(t) = \begin{cases} \frac{k}{r_1 - r_2} \left[\frac{Ku_0 - r_2}{r_1} e^{r_1 t} - 1 - \frac{Ku_0 - r_1}{r_2} e^{r_2 t} - 1 \right], & K < 1/4; \\ k \left[4 + u_0 - 1 - e^{-t/2} - \left(1 + \frac{u_0}{2} \right) t e^{-t/2} \right], & K = 1/4; \\ \frac{k}{K} \left\{ 1 + Ku_0 + e^{-t/2} \left[\frac{K \left(1 - \frac{u_0}{2} \right) - 1/2}{\sqrt{K - 1/4}} \sin \sqrt{K - 1/4} t - \right. \right. \\ \left. \left. - 1 + Ku_0 \cos \sqrt{K - 1/4} t \right] \right\}, & K > 1/4. \end{cases} \quad (5.7)$$

Траектория движения заряда зависит от параметров K и k , а также от значения u_0 . Возможны три варианта:

- заряд долетает до второго электрода Э2;
- заряд остается в зазоре, совершая затухающие колебания;
- заряд тормозится настолько сильно, что возвращается в плоскость первого электрода Э1.

Колебательный характер движения обусловлен тем, что кинетическая энергия заряда по мере торможения преобразуется в энергию, запасаемую емкостью. Заряд, не долетая до Э2, останавливается, затем движется обратно. Так как энергия рассеивается в сопротивлении R , то энергия заряженной ёмкости оказывается меньше начальной кинетической энергии заряда. Возвращающийся заряд останавливается, не долетая Э1, и под влиянием теперь уже ускоряющего напряжения $u(t)$ снова начинает двигаться к Э2. С уменьшением временного параметра k возрастает время пребывания заряда в зазоре, достаточно для того, чтобы произошло несколько колебаний.

Характер процесса в электрической цепи (см. рис. 5.1) зависит от заряда q и массы M частицы, межэлектродного расстояния d , емкости C , сопротивления R , начальной скорости v_0 , начального напряжения на емкости. При этом пренебрегаем силой тяготения, сопротивлением

среды, заполняющей промежуток между электродами, и т. п. Разумеется, можно учесть названные факторы, введя дополнительные слагаемые в исходные уравнения, но при этом возрастает число параметров задачи.

Критерий подобия в общем случае определим как

$$K = \frac{q^2 R^2 C}{M d^2}.$$

При использовании безразмерных величин достаточно взять три параметра: K , k и u_0 . Независимой переменной искомых функций является нормированное к RC время. В зависимости от значений безразмерных параметров возможны следующие явления:

- удержание заряженных частиц внутри зазоров с резистивными стенками;
- изменение направления движения заряда на противоположное с меньшей энергией, чем при влете в зазор (отражение заряда);
- возникновение затухающих колебаний с частотой

$$f_p = \sqrt{\frac{q^2}{C M d^2} - \frac{1}{4 R^2 C}} \frac{1}{2\pi}$$

и временем релаксации $2 RC$.

Если время пролета частицы в зазоре пренебрежимо мало по сравнению с постоянной цепи, то преобразование кинетической энергии заряда в электрическую энергию емкости не успеет произойти, и заряд пролетит через зазор. Поэтому для возникновения перечисленных выше явлений в системе обязательно должно быть запаздывание, т. е. конечное время пролета. Ёмкость C служит элементом памяти, в котором хранится информация об энергии частицы в предыдущие моменты времени. Сопротивление R необходимо для создания электрического поля, взаимодействующего с зарядом. По-видимому, его можно реализовать в виде элемента связи с внешней колебательной системой.

Выше мы рассмотрели возможные варианты движения заряженных частиц, используя представления о наведенном токе, что позволило создать простую математическую модель системы. Однако возможны иные подходы к решению данной задачи. Так, например, взаимодействие заряда с электрическим полем можно трактовать как индуцирован-

ное излучение энергии зарядом под действием самосогласованного поля. Наиболее просто энергия излучения вычисляется в случае удержания заряда: она равна кинетической энергии $Mv_0^2/2$.

Далее приведем уравнения для задачи о движении заряда q массой M в плоскоэлектродном промежутке шириной d , параллельно которому подключена RL -цепь, а зазор является емкостной частью резонатора. Используя те же характерные величины, что и в предыдущем случае, запишем уравнение движения и законы Кирхгофа в безразмерных переменных:

$$\begin{aligned}\frac{dv(t)}{dt} &= Ku(t), \\ u(t) &= -i(t) - Q^2 \frac{di}{dt}, \\ i(t) &= v(t) + \frac{1}{K} \frac{d^2v(t)}{dt^2}.\end{aligned}\tag{5.8}$$

Здесь $Q = \sqrt{L/C}/R$ – добротность резонатора. Начальная скорость v_0 направлена от Э1 к Э2. В момент влёта заряда в зазор напряжение на емкости равно u_0 , а ток через последовательно соединённые индуктивность L и сопротивление – i_0 . Систему (5.8) приведем к дифференциальному уравнению третьего порядка:

$$Q^2 \frac{d^3v}{dt^3} + \frac{d^2v}{dt^2} + (1 + KQ^2) \frac{dv}{dt} + Kv(t) = 0.\tag{5.9}$$

В частном случае при $L = Q = 0$ уравнение (5.9) переходит в (5.3). Решение уравнения (5.9) определяется корнями характеристического уравнения

$$r^3 + Q^{-2}r^2 + (K + Q^{-2})r + KQ^{-2} = 0,\tag{5.10}$$

а значит, конкретными значениями K и Q . Угол пролёта заряда в зазоре зависит, кроме того, и от значения параметра k .

Найдя решение уравнения (5.9), можно написать выражение для $u(t)$ и $i(t)$. Координату $x(t)$ заряда определяем, как и в предыдущем случае,

по формуле (5.6). Таким образом, математическая модель для случая $L \neq 0$ содержит дополнительный параметр Q и дополнительное начальное условие $i(0) = i_0$.

Полученные выше уравнения (5.1) – (5.10) описывают процессы, происходящие в течение того интервала времени, когда заряд находится в межэлектродном промежутке, т. е. при $0 \leq x(t) \leq 1$. Когда заряд в зазоре отсутствует, процессы в цепи, рис. 5.1, описываются уравнениями теории электрических цепей.

Задание на лабораторную работу. Ознакомиться с системой MatLab по одной из книг, изданных в последние годы. Например, в Интернете можно найти книгу, предназначенную для студентов, аспирантов, преподавателей технических вузов и специалистов, применяющих математические вычисления в профессиональной деятельности: *Половко А.М., Бутусов П.Н. MATLAB для студента.* – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 320 с.

Используя систему MatLab, построить на экране компьютера и привести в отчёте зависимости токов в элементах цепи, скорости и координаты заряда в функции времени при разных значениях параметров.

Дать физическую интерпретацию полученным зависимостям. Предложить устройство, в котором используется рассматриваемая цепь.

В а р и а н т 2. Исследование коэффициента квантового усиления

Цель лабораторной работы: ознакомление с методом математического моделирования квантовых приборов; приобретение навыков работы с программой MatLab; исследование зависимости коэффициента квантового усиления α активной среды от длины волны λ излучения.

Содержание лабораторной работы: построить зависимости $\alpha(\lambda)$ при заданных параметрах активной среды. Дать физическое объяснение полученным зависимостям.

Коэффициент квантового усиления – показатель увеличения мощности излучения на единицу длины активной среды:

$$\alpha \text{ (м}^{-1}\text{)} = Bh\nu(N_n - N_m)/\nu.$$

Здесь B – коэффициент Эйнштейна для индуцированного излучения, h – постоянная Планка, ν – частота излучения, N_n – населённость верх-

него уровня, N_m – населённость нижнего энергетического уровня, ν – скорость распространения излучения в активной среде.

Вначале выполнить расчёт теста. При этом задать следующие значения параметров:

$$\nu = c / 1,5; N_n = 10^{27} \text{ см}^{-3}; N_m = 10^{26} \text{ см}^{-3},$$

где c – скорость света.

Коэффициент Эйнштейна для спонтанного излучения $A = 1/\tau$ зависит от времени жизни τ частицы в возбуждённом состоянии. Принять $\tau = 10^{-8} \text{ с}$. Коэффициент Эйнштейна B для индуцированного излучения определять через коэффициент Эйнштейна A для спонтанного излучения по формуле

$$B = A / (8\pi h \nu^3 / c^3).$$

Длину волны излучения менять в пределах видимого спектра. Вычисления выполнять в системе MatLab.

Пользуясь выражением (4.1), рассчитать в системе MatLab лазер, т. е. рассчитать длину оптического резонатора и допустимые значения коэффициентов.

3. ЗАДАЧИ

1. Движение носителей заряда в электромагнитных полях

1.1. К электровакуумному диоду с плоскими электродами, расстояние между катодом и анодом которого составляет 400 мкм, приложено напряжение, плавно увеличивающееся за каждую секунду на 10 В. Из катода вылетает один электрон. Начальная скорость электрона равна нулю, электрон покидает катод при нулевом напряжении на диоде. Вычислить время пролёта электрона в диоде и скорость, с которой он попадает на анод. Изобразить на рисунках график напряжения на диоде и траекторию электрона.

1.2. В большом адронном коллайдере (Европейский центр ядерных исследований) протоны ускоряют до энергии 7 ТэВ. Вычислить отношение энергии ускоренного протона к энергии, соответствующей его массе покоя $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.

1.3. Вычислить скорость электрона, ускоренного до энергии 1 ТэВ. Определить отношение этой энергии к энергии покоя электрона.

1.4. Электрон вращается по окружности в однородном постоянном магнитном поле в вакууме. Как изменится радиус траектории электрона, если его скорость уменьшить в 5 раз, а индукцию магнитного поля увеличить в 10 раз?

1.5. В некотором микроволновом приборе скорость электрона в функции времени изменяется по закону

$$v(t) = 8 \sin(100 t) \text{ км/с.}$$

Изобразить графики координаты, скорости и ускорения электрона. Начальные условия нулевые. По осям графиков указать обозначения ве-

личин, масштабы и единицы измерения. Определить частоту колебаний.

1.6. В вакууме создано постоянное магнитное поле с индукцией B . В него влетает электрон с начальной скоростью v_0 . На рисунке изобразите вектор магнитной индукции, вектор скорости и вектор силы Лоренца, действующей на электрон со стороны магнитного поля. Запишите формулу для силы Лоренца. По какому правилу определяется направление силы Лоренца?

1.7. Электрон, ускоренный разностью потенциалов 300 В, движется параллельно прямолинейному проводу на расстоянии 4 мм от него. При включении источника питания по проводу течёт ток 5 А. Вычислить силу, действующую на электрон со стороны провода. Сделать рисунок и объяснить физические процессы.

1.8. Параллельно зазору с плоскими электродами подключены сопротивление 100 Ом и ёмкость (с учётом ёмкости между электродами) 1 пФ. Электроды расположены в вакууме. Расстояние между электродами 2 мм. В зазор влетает тонкий слой электронов, их заряд составляет $2,85 \cdot 10^{-10}$ Кл. Начальные скорости электронов 10^7 м/с. В момент влёта электронов в зазор напряжение является тормозящим для электронов и равно по величине 142,5 В. Рассчитать и изобразить на графиках зависимости: скорость и координата электронов, токи через резистор и ёмкость, напряжение на сопротивлении и ёмкости, наведённый ток через сопротивление. Вычислить время пребывания электронов между электродами.

1.9. Полагая, что скорость электрона в зазоре остаётся постоянной и равной $2 \cdot 10^8$ м/с, вычислить угол пролёта электрона в зазоре шириной 200 мкм на частоте 5 ГГц.

1.10. Зазор электровакуумного прибора СВЧ образован плоскими электродами, расстояние между которыми составляет 1 мм. Из плоскости первого электрода вылетает тонкий слой электронов с зарядом 10^{-9} Кл. Начальная скорость электронов равна 10^5 м/с. Между электродами включен источник постоянного напряжения. Потенциал второго электрода относительно первого электрода +1 В. Рассчитать и построить импульс наведённого тока, протекающего во внешней цепи. Вычислить длительность импульса наведённого тока.

1.11. Вычислить отношение силы кулоновского отталкивания к силе гравитационного притяжения для: а) двух электронов; б) двух протонов.

1.12. Вывести формулу для отношения энергии электростатического взаимодействия двух частиц с зарядом q и массой m к энергии их гравитационного взаимодействия. Пользуясь выведенной формулой, вычислить эти отношения для двух протонов и двух электронов. Сделать выводы на основании полученных результатов.

1.13. Пользуясь законами классической электродинамики, определить величину расстояния, на которое могут сблизиться два электрона, движущиеся в вакууме навстречу друг другу с относительной скоростью 10^8 см/с. Наличие спина у электронов не учитывать.

1.14. Пользуясь законами классической электродинамики, определить величину расстояния, на которое могут сблизиться электрон и протон, движущиеся в вакууме навстречу друг другу с относительной скоростью 10^8 см/с. Учесть наличие спинов, а значит, и магнитных полей у электрона и протона.

1.15. В коллайдере два протона движутся навстречу друг другу с энергией 0,5 ТэВ. На какое минимальное расстояние они могут сблизиться?

1.16. При бомбардировке неподвижного ядра натрия α -частицей сила отталкивания между ними достигла 14 кг. На какое расстояние приблизилась α -частица к ядру атома натрия? Вычислить начальную скорость α -частицы. Влияние электронной оболочки атома натрия не учитывать.

1.17. Электрон со скоростью v_0 влетает в пространство между двумя плоскими электродами прибора СВЧ параллельно им на равном расстоянии от них. Между электродами расстояние $d = 0,5$ мм. К электродам приложено постоянное напряжение $U = 2$ В. Вычислить предельную скорость v_0 , при которой электрон не вылетит из зазора.

1.18. Электрон, движущийся в вакууме со скоростью 10^6 м/с, попадает в магнитное поле цилиндрического провода, по которому протекает постоянный ток 600 А. Радиус провода 5 мм. На расстоянии 5 см от провода электрон двигался перпендикулярно проводу. Вычислить траекторию движения электрона и построить её график.

2. Полупроводниковые приборы СВЧ

2.1. Лавинно-пролётный диод, изготовленный из кремния, работает в пролётном режиме. Структура диода: $p^+-n-i-n^+$. Сопротивление потерь диода 0,8 Ом. Плотность постоянной составляющей тока диода 200 А/см^2 , толщина слоя умножения 1 мкм, ширина i -области 4 мкм, площадь поперечного сечения диода $5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$, производная коэффициента ионизации по напряжённости электрического поля равна $0,04 \text{ В}^{-1}$. Рассчитать полный импеданс диода на частотах 8, 9, 10 и 11 ГГц.

2.2. Туннельный диод характеризуется параметрами: ёмкость перехода 2 пФ; индуктивность выводов 0,1 нГн, сопротивление потерь 1,5 Ом; абсолютная величина дифференциальной отрицательной проводимости 0,1 См. Вычислить предельную и резонансную частоты туннельного диода.

2.3. Диод Ганна, изготовленный из пластинки арсенида галлия толщиной 0,1 мм, работает в пролётном режиме. Оценить частоту генерируемых автогенератором на диоде Ганна колебаний. Скорость движения доменов полагать равной дрейфовой скорости насыщения электронов. Изобразить схему автогенератора на диоде Ганна и объяснить его работу.

2.4. Туннельный диод имеет следующие значения параметров: ёмкость перехода 3 пФ; индуктивность выводов 0,2 Гн; сопротивление потерь 5 Ом; абсолютная величина отрицательной дифференциальной проводимости 0,02 См. Определить предельную и резонансную частоты туннельного диода. Рассчитать входной импеданс диода в диапазоне частот от 2 ГГц до 4 ГГц. Привести схему генератора на туннельном диоде.

2.5. Потери преобразования смесительного диода СВЧ составляют 6 дБ при мощности входного сигнала 3 мВт. Вычислить мощность сигнала промежуточной частоты. Привести принципиальную схему преобразователя и эскиз конструкции.

2.6. Диод Рида, изготовленный из кремния (относительная диэлектрическая проницаемость кремния равна 12), работает в лавинно-пролётном режиме. Плотность постоянной составляющей тока диода 200 А/см^2 , толщина слоя умножения 1 мкм, ширина i -области 4 мкм, площадь поперечного сечения диода $5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$, производная коэффициента ионизации по напряжённости электрического поля равна $0,04 \text{ В}^{-1}$.

Рассчитать полный импеданс диода в диапазоне частот от 8 ГГц до 12 ГГц. Структура диода: $p^+-n-i-n^+$. Сопротивление потерь пассивной части диода 0,5 Ом. Привести принципиальную схему автогенератора СВЧ на лавинно-пролётном диоде.

2.7. В усилителе отражательного типа с циркулятором применили туннельный диод, имеющий следующие параметры. Ёмкость перехода 0,25 пФ; индуктивность выводов 0,1 нГн; сопротивление потерь 1 Ом; дифференциальное сопротивление –50 Ом. Определить предельную и резонансную частоты туннельного диода и рассчитать его входной импеданс в диапазоне частот от 3 ГГц до 5 ГГц. Вычислить и построить график частотной характеристики усилителя.

2.8. Вычислить коэффициент усиления усилителя на диоде Ганна при следующих параметрах: расстояние между СВЧ входом и выходом 40 мкм; равновесная концентрация электронов в диоде Ганна $9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; дифференциальная подвижность –1000 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Относительная диэлектрическая проницаемость арсенида галлия, из которого изготовлен диод Ганна, равна 11. Скорость распространения нарастающей волны объёмного заряда $1,2 \cdot 10^7 \text{ см/с}$. Изобразить схему усилителя на диоде Ганна.

2.9. На варактор, используемый в преобразователе частоты, подают сигнал с частотой 70 МГц и мощностью 2,3 мВт. Частота генератора накачки 6 ГГц. Сигнал на выходе преобразователя имеет частоту 6,07 ГГц. Пользуясь соотношениями Мэнли–Роу, определить требуемую мощность накачки и предельное усиление преобразователя (отношение мощностей выходного и входного сигналов). Изобразить схему преобразователя частоты гигагерцевого диапазона.

2.10. Рабочая частота генератора на диоде Ганна должна быть равна 10 ГГц. Ёмкость корпуса диода 0,3 пФ. Определить остальные параметры эквивалентной схемы диода Ганна и величину эквивалентной индуктивности объёмного резонатора, исходя из следующих параметров. Постоянная составляющая протекающего через диод тока равна 174 мА; амплитуда активной и реактивной составляющей первой гармоники тока равна соответственно 20 мА и 50 мА; амплитуда напряжения 5 В; постоянное напряжение 6,4 В. Изобразить схему генератора и вычислить его КПД.

2.11. Оценить частоту генерации диода Ганна в пролётном режиме, если длина GaAs кристалла составляет 210 мкм, подвижность электро-

нов $5,4 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, напряжённость электрического поля вне диода на $2,2 \text{ кВ/см}$. Изобразить схему генератора на диоде Ганна.

2.12. Оценить максимальную частоту усиления по мощности транзистора, имеющего следующие справочные данные: граничная частота усиления по току 600 МГц , сопротивление базы 2 Ом ; ёмкость коллекторного перехода 10 пФ . Определить коэффициент усиления мощности на частоте 400 МГц . Изобразить схему усилителя СВЧ на транзисторе. Объяснить работу транзистора и транзисторного усилителя. Перечислить способы повышения граничной частоты транзистора.

2.13. Отрицательная проводимость диода Ганна обуславливается междолинным переходом электронов проводимости. В свою очередь, для осуществления междолинного перехода электроны должны быть «разогреты» до определённой температуры. Эти процессы характеризуют два параметра:

- $\tau_{\text{мп}} \approx 5 \cdot 10^{-14} \text{ с}$ – длительность междолинного перехода;
- $\tau_{\text{э}} \approx 10^{-12} \text{ с}$ – длительность изменения температуры электронов.

Исходя из этих временных параметров, оценить максимальную рабочую частоту и минимальную длину волны, на которых может работать диод Ганна.

2.14. Оценить критическую частоту параметрического диода, имеющего барьерную ёмкость $0,01 \text{ пФ}$ при отсутствии напряжения. Коэффициент модуляции эластанса $0,8$, постоянная времени параметрического диода $0,1 \text{ с}$. Изобразить схему двухконтурного параметрического усилителя с генератором накачки на диоде Ганна в интегральном исполнении. Объяснить назначение всех узлов и работу усилителя.

3. Параметры и характеристики усилителей и автогенераторов

3.1. Отношение амплитуд сигнала и шума на входе усилителя равно 2^{16} . Выразить отношение сигнал/шум в децибелах.

3.2. Усилитель должен обеспечить мощность в выходном резонаторе 4 кВт при мощности сигнала на входе 160 Вт. Сопротивление резонатора 2800 Ом. Напряжение источника питания 5 кВ. Амплитуда первой гармоники тока, протекающего через резонатор, равна 1,7 А. Постоянная составляющая тока, потребляемого усилителем от источника питания, составляет 1 А. Вычислить коэффициент полезного действия и коэффициент усиления (в разгах и в децибелах) усилителя. Изобразить структурную схему усилителя и источника питания. На схеме указать направления передачи мощностей, упоминающихся в условии задачи.

3.3. Привести условные обозначения биполярных транзисторов $n-p-n$ и $p-n-p$ -типов. Указать названия выводов, переходов и направления протекания токов в обычном режиме. Объяснить, благодаря какому свойству транзистор усиливает электрические сигналы. Предложить способ определения исправности транзистора при помощи омметра.

3.4. Коэффициент усиления усилителя равен 15 дБ, входная мощность — 8 мВт. Вычислить выходную мощность усилителя.

3.5. Рассчитать затухание кабеля в децибелах, если всего лишь 25 % подаваемой к кабелю мощности появляется на его выходе.

3.6. Рассчитать сопротивления симметричного Т-образного аттенуатора, обеспечивающего затухание 20 дБ, включенного в линию с волновым сопротивлением 50 Ом.

3.7. Рассчитать резистивную согласующую цепь между линиями с волновыми сопротивлениями в 75 и 50 Ом. Определить затухание, вносимое в тракт этой цепью.

3.8. Определить величины сопротивлений симметричного П-образного аттенуатора с ослаблением 25 дБ, включенного в линию с волновым сопротивлением 600 Ом.

3.9. При экспериментальном исследовании частотной характеристики транзисторного усилителя входная мощность на всех частотах оставалась одинаковой и равной 10 мкВт. На частоте 4 ГГц коэффициент усиления максимален (36 дБ), на частотах 3,91 ГГц и 4,09 ГГц коэффициент усиления составил 30 дБ. Вычислить абсолютную и отно-

сительную полосу усиления усилителя по уровню 30 дБ. Определить выходную мощность на указанных частотах. Изобразить схему транзисторного усилителя.

3.10. Привести условные обозначения полевых транзисторов с управляющим p – n -переходом и с изолированным затвором. Указать названия выводов, переходов и направления протекания токов в обычном режиме. Объяснить, благодаря каким свойствам полевой транзистор усиливает электрические сигналы. Предложить способ определения исправности полевого транзистора при помощи омметра.

3.11. Квантовый парамагнитный усилитель отражательного типа имеет следующие параметры: добротность резонатора без парамагнитного кристалла равна 10^4 , добротность устройства связи 1000, магнитная добротность 975. Определить коэффициент усиления на частоте сигнала, равной собственной частоте объёмного резонатора. Привести схему квантового парамагнитного усилителя отражательного типа с использованием объёмного резонатора.

3.12. Нарисовать принципиальную схему и эквивалентную схему по высокой частоте транзисторного автогенератора с кварцем, включенным между эмиттером и базой. Записать условия, при которых возможно возникновение и существование колебаний в автогенераторе. Дать объяснения.

3.13. Изобразить структурную схему автогенератора с обратной связью, включенной между выходной цепью автогенератора и входной цепью. На схеме показать источники питания и возбуждения. Записать условия, при выполнении которых в автогенераторе могут возникнуть и существовать гармонические колебания.

3.14. Изобразить принципиальную схему усилителя гармонических колебаний, в котором используется триод и объёмные резонаторы. Объяснить принцип его действия. Изобразить эквивалентную схему выходной цепи усилителя. Доказать, что для выходного резонатора триод кажется отрицательным сопротивлением. Чем определяется величина и знак этого сопротивления?

3.15. Двухрезонаторный пролётный клистрон работает в режиме умножения частоты в 3 раза. На его вход поступает сигнал с частотой 300 МГц мощностью 2 Вт. Ускоряющее напряжение 250 В, ток луча 20 мА, длина трубы дрейфа 16 мм. Характеристические сопротивления резонаторов 20 Ом, собственные добротности резонаторов 600, а нагруженная добротность выходного резонатора 200. Протяжённость зазоров одинакова: 0,1 мм. Вычислить выходную мощность умножителя частоты.

3.16. Рассчитать максимальную и минимальную мощности на выходе усилителя модулированных по амплитуде колебаний, если в режиме усиления несущей выходная мощность равна 1 кВт, а коэффициент модуляции равен 0,8. Оценить мощность каждой из боковых частот. Изобразить спектр амплитудно-модулированных колебаний.

3.17. Автогенератор содержит полупроводниковый диод, к которому приложено обратное напряжение, вмонтированный в микроволновый объёмный резонатор. Оптимальное значение частоты определяется условием: время пролёта должно быть равно половине периода. Вычислить частоту генерируемых колебаний, если ширина области пространственного заряда равна 10^{-2} мм. Носители заряда пролетают эту область со скоростью 10^7 см/с. Изобразить конструкцию автогенератора, его принципиальную схему и эквивалентную схему.

3.18. Запасённая диодом Ганна энергия электрического поля равна W_0 . У инженера имеются варактор и ферритовый элемент, каждый из которых может запасать энергию в соответствующей форме и позволяет изменять её на величину $\pm \alpha W_0$, где α – малая величина. Определить отношение диапазона частотной перестройки с помощью феррита к диапазону частотной перестройки с помощью варактора. Изобразить схемы генераторов на диоде Ганна при перестройке варактором и при перестройке ферритом.

4. Цепи сверхвысоких частот

4.1. Эквивалентная схема цепи СВЧ представляет собой параллельное соединение сопротивления $R = 200$ Ом и ёмкости $C = 5$ пФ. Эта цепь подключена параллельно зазору с плоскими электродами. Расстояние между электродами $d = 2$ мм. В зазор влетает тонкий слой электронов, суммарный заряд которых $q = -2,85 \cdot 10^{-10}$ Кл, а начальные скорости электронов $v(0) = 10^7$ м/с. В момент влёта электронов в зазор напряжение на зазоре $u(0) = -42,5$ В. Рассчитать и изобразить на графиках следующие функции времени. Скорость и координата электронов, токи через резистор и ёмкость, напряжение на цепи RC . Интервал времени рассмотрения: время пролёта заряда между электродами.

4.2. Эквивалентная схема резонатора СВЧ представляет собой подключенные параллельно зазору с плоскими электродами: резистор $R = 150$ Ом, ёмкость $C = 5$ пФ, индуктивность $L = 2 \cdot 10^{-10}$ Гн. Расстояние между электродами $d = 2$ мм. В зазор влетает тонкий слой электронов, суммарный заряд которых $q = -5,7 \cdot 10^{-11}$ Кл, начальные скорости электронов $v(0) = 10^8$ м/с. В момент влёта электронов в зазор напряжение на зазоре равно $u(0) = 28,5$ В; ток через индуктивность $i(0) = 0,5$ А. Рассчитать и изобразить на графиках зависимости от времени: скорость и координата электронов; токи, протекающие через R , C и L ; напряжение на зазоре. Интервал времени рассмотрения: время пролёта заряда между электродами.

4.3. Между главной линией с волновым сопротивлением $Z_B = 320$ Ом и нагрузкой $R = 80$ Ом включен четвертьволновый трансформатор сопротивлений. Вычислить требуемое волновое сопротивление четвертьволнового отрезка линии, чтобы в основной линии был обеспечен режим согласования, и коэффициент бегущей волны был бы равен единице.

4.4. Эквивалентная схема резонатора СВЧ представляет собой подключенные параллельно зазору с плоскими электродами: ёмкость C и RL -цепь. Расстояние между электродами d . В момент времени $t = 0$ в зазор влетает тонкий слой электронов, суммарный заряд которых q , а начальные скорости $v(0)$. В момент влёта электронов напряжение на зазоре равно $u(0)$; ток через RL -цепь $i(0)$.

Запишите систему уравнений, описывающих переходной процесс в течение интервала от $t = 0$ до того момента времени, пока заряд находится внутри зазора. Искомые функции времени: скорость и координата электронов, токи через ёмкость и RL -цепочку, напряжение на зазоре,

наведённый ток. Запишите систему уравнений для интервала времени, когда заряд покинул зазор.

4.5. Параллельно зазору электровакуумного прибора СВЧ подключены: резистор сопротивлением $R = 150 \text{ Ом}$, ёмкость $C = 5 \text{ пФ}$, индуктивность $L = 2 \cdot 10^{-10} \text{ Гн}$. Расстояние между электродами $d = 2 \text{ мм}$. В зазор влетает тонкий слой электронов, суммарный заряд которых $q = 5,7 \cdot 10^{-11} \text{ Кл}$, а начальные скорости $v(0) = 10^8 \text{ м/с}$. В момент влёта электронов в зазор напряжение на зазоре равно $u(0) = 28,5 \text{ В}$; ток через индуктивность $i(0) = 0,5 \text{ А}$. Рассчитать и изобразить на графиках зависимости: скорость и координата электронов, наведённый ток в резисторе, ёмкостной и индуктивный токи, напряжение на резисторе R в функции времени.

4.6. Рассчитать входное сопротивление коаксиальной линии, короткозамкнутой на конце, на частоте 400 МГц . Внутренний диаметр линии 1 см , внешний диаметр линии 3 см . Длина линии 10 см . Потери в линии не учитывать.

4.7. Определить величину ёмкости, необходимой для настройки в резонанс на частоту $0,5 \text{ ГГц}$ отрезка короткозамкнутой коаксиальной линии длиной 10 см . Внутренний и внешний диаметры линии равны соответственно 2 см и $5,5 \text{ см}$. Потери в линии не учитывать.

4.8. Полосковая линия с волновым сопротивлением 50 Ом присоединена параллельно полупроводниковому диоду, входная ёмкость которого равна $0,2 \text{ пФ}$. Определить сопротивление параллельного соединения на волне 10 см при длине линии: $5; 4; 3; 2; 1; 0,5 \text{ см}$.

4.9. Полупроводниковый диод с входной ёмкостью $0,5 \text{ пФ}$ присоединён параллельно полосковой линии с волновым сопротивлением 100 Ом длиной 5 см . Определить резонансные частоты этого соединения.

4.10. Пользуясь круговой диаграммой полных сопротивлений и проводимостей, определить величину коэффициента стоячей волны, соответствующую нагрузке $(30 + j50) \text{ Ом}$. Волновое сопротивление линии равно 75 Ом .

4.11. Внутренний импеданс источника сигнала равен 60 Ом . Импеданс нагрузки 240 Ом . Рассчитать согласующую цепь на резисторах. Оценить ослабление сигнала, вносимое этой цепью.

4.12. Внутреннее сопротивление источника сигнала равно 200 Ом , а сопротивление нагрузки 75 Ом . Рассчитайте цепь, которую надо включить между источником сигнала и нагрузкой для предотвращения отражений сигналов.

4.13. Эквивалентная схема полупроводникового кристалла представляет собой последовательное соединение сопротивления $R_{\text{посл}}$ и ёмкости $C_{\text{посл}}$. Вывести формулы для пересчёта их в параллельное соединение сопротивления $R_{\text{пар}}$ и ёмкости $C_{\text{пар}}$. Пользуясь полученными формулами, задать конкретные значения исходных элементов и получить значения искомых величин.

4.14. Эквивалентная схема полупроводникового диода представляет собой параллельное соединение сопротивления $R_{\text{пар}}$ и ёмкости $C_{\text{пар}}$. Вывести формулы для пересчёта их в последовательное соединение сопротивления $R_{\text{посл}}$ и ёмкости $C_{\text{посл}}$. Пользуясь полученными формулами, задать конкретные значения исходных элементов и получить значения искомых величин.

4.15. На лицевой панели измерителя мощности СВЧ имеется предупредительная надпись:

Внимание! Не превышайте мощность +16 дБм

Что представляет собой единица измерения мощности 1 дБм? Рассчитать величину мощности, которую нельзя превышать при измерениях данным измерителем, в ваттах. Пояснить расчётную формулу.

4.16. Рассчитать и построить график стоячей волны напряжения и тока при коэффициенте стоячей волны, равном 3, вдоль однородной линии без потерь. Точки на графике располагать через интервал $\lambda/16$ по направлению к нагрузке от точки минимума напряжения.

4.17. Сформулировать и объяснить условия баланса амплитуд и баланса фаз для автогенератора. Привести математическую запись этих условий.

5. Приборы с электростатическим и электродинамическим управлением электронными потоками

5.1. Вычислить электронный КПД усилительного двухрезонаторного клистрона. Известны следующие величины: коэффициенты связи электронного потока с полем первого и второго зазоров равны соответственно 0,9 и 0,8; отношение амплитуд колебательных напряжений на первом и втором зазорах к ускоряющему напряжению: 0,04 и 0,95; угол пролёта невозмущённого электрона в трубе дрейфа равен 32 рад. Резонаторы настроены на частоту усиливаемого сигнала.

5.2. Рассчитать КПД и коэффициент усиления по мощности двухрезонаторного пролётного клистрона при следующих данных: постоянное ускоряющее напряжение 625 В; расстояние между центрами зазоров 1 см; частота усиливаемого сигнала 6 ГГц; добротности резонаторов 2000 и их волновые сопротивления 100 Ом; активная электронная проводимость в первом зазоре равна $2,5 \cdot 10^{-5}$ См; коэффициенты взаимодействия электронного потока с полями резонаторов 0,9; отношения амплитуд колебательных напряжений на первом и втором зазорах к ускоряющему напряжению равны соответственно 0,2 и 0,95; нагруженная добротность выходного резонатора 50. Оба резонатора настроены на частоту усиливаемого сигнала.

5.3. Двухрезонаторный пролётный клистрон используется для умножения частоты. На его вход поступает сигнал с частотой 0,3 ГГц мощностью 2 Вт. Ускоряющее напряжение 250 В, ток луча 20 мА, длина трубы дрейфа 16 мм. Выходной резонатор настроен на вторую гармонику входного сигнала. Характеристические сопротивления резонаторов 20 Ом, собственные добротности резонаторов 500, нагруженная добротность выходного резонатора 200. Ширина зазоров одинакова и равна 0,5 мм. Вычислить мощность на выходе клистрона.

5.4. Рассчитать и построить амплитудную характеристику двухрезонаторного усилительного пролётного клистрона, работающего на частоте 6 ГГц. Ток луча 160 мА, ускоряющее напряжение 625 В. Расстояние между центрами зазоров 8 мм, ширина зазоров 0,1 мм, характеристические сопротивления резонаторов 100 Ом, собственные добротности резонаторов 1000, нагруженная добротность выходного резонатора 100.

5.5. Электрон вылетает из зазора отражательного клистрона со скоростью 10^6 м/с и попадает в пространство отражателя, где имеется од-

нородное постоянное электрическое поле величиной 10^4 В/м. Вычислить время пролёта электрона в пространстве отражателя. Изобразить устройство отражательного клистрона вместе с подсоединёнными к нему источниками питания.

5.6. Рассчитать коэффициент электронного взаимодействия электронов с электрическим полем зазора пролётного клистрона и электронную проводимость при следующих данных: постоянное ускоряющее напряжение 40 кВ; ток луча 8 А; частота усиливаемого сигнала 7,4 ГГц. Ширина зазора 4 мм.

5.7. Работа отражательного клистрона характеризуется следующими значениями параметров: напряжение резонатора 300 В; напряжение отражателя в центре второй зоны генерации 120 В; ток резонатора 20 мА; собственная частота объёмного резонатора 8 ГГц; нагруженная добротность 150; коэффициент взаимодействия электронов с полем резонатора 0,9; эквивалентная ёмкость резонатора 1 пФ. Вычислить крутизну и диапазон электронной перестройки частоты для данной зоны генерации.

5.8. Напряжение между катодом и резонатором отражательного клистрона 150 В, ток луча 160 мА. Угол пролёта невозмущённого электрона равен 270° . Проводимость нагрузки равна проводимости резонатора и составляет 0,001 См. Вычислить амплитуду установившихся колебаний, электронный коэффициент полезного действия и мощность в нагрузке. Коэффициент взаимодействия электронов с электрическим полем объёмного резонатора считать равным единице.

5.9. Рассчитать электронный коэффициент полезного действия усилительного двухрезонаторного клистрона, если заданы следующие величины. Коэффициенты связи электронного потока с электрическим полем первого и второго зазоров соответственно равны 0,9 и 0,87; отношение амплитуд переменных напряжений на первом и втором зазорах к ускоряющему напряжению: 0,04 и 0,95. Угол пролёта невозмущённого электрона в трубе дрейфа равен 32 рад. Резонаторы настроены на частоту усиливаемого сигнала.

5.10. Напряжение между резонатором и катодом отражательного клистрона 250 В. Максимум выходной мощности наблюдается при напряжении отражателя -300 В. При этом угол пролёта невозмущённого электрона 990° . Вычислить напряжения отражателя, соответствующие максимальным мощностям в двух ближайших зонах.

5.11. Колебательная мощность, развиваемая электронным потоком в резонаторе отражательного клистрона, составляет 150 мВт. При этом

постоянная составляющая тока резонатора 20 мА; напряжение резонатора 300 В; генерация происходит в центре зоны; напряжение отражателя 350 В; длина волны генерируемых колебаний 3,2 см. Расстояние между отражателем и ближайшей к нему сеткой 2 мм, расстояние между сетками 0,16 мм. Проводимость нагрузки $0,2 \cdot 10^{-3}$ См, проводимость резонатора $0,15 \cdot 10^{-3}$ См. Определить номер зоны генерации, величину пускового тока, электронный КПД и мощность в нагрузке. Изобразить схему отражательного клистрона и объяснить принцип его действия.

5.12. Отражательный клистрон работает при напряжении резонатора 250 В. Нагруженная добротность резонатора 100. Расстояние между отражателем и второй сеткой резонатора 3 мм. Определить номер зоны генерации. Рассчитать и построить график частоты колебаний от напряжения отражателя для этой зоны. Собственная частота резонатора 3 ГГц, а напряжение отражателя в центре зоны 290 В.

5.13. Вычислить коэффициент усиления и выходную мощность трёхрезонаторного пролётного клистрона при синхронной настройке всех резонаторов на частоту усиливаемого сигнала 3,5 ГГц. Длина всех труб дрейфа одинакова: 2 см. Зазоры 2 мм. Ток луча 100 мА, напряжение питания 3 кВ. Характеристические сопротивления резонаторов 50 Ом, собственные добротности резонаторов 3000. Нагруженная добротность выходного резонатора 500. Входная мощность равна 10 мВт.

6. Приборы с длительным взаимодействием электронов и бегущих электромагнитных волн

6.1. Коэффициент усиления лампы бегущей волны 30 дБ, полоса усиливаемых частот 500 МГц. Мощность входного сигнала 10 мВт, коэффициент шума 8 дБ. Вычислить мощность собственных шумов на выходе ЛБВ.

6.2. В замедляющей системе ЛБВ при усилении сигнала с частотой 8 ГГц, сдвиг фазы на один период замедляющей системы для нулевой пространственной гармоники равен 18° . Вычислить значения волнового вектора, фазовой скорости и коэффициента замедления для пространственных гармоник с номерами 2; 1; 0; -1; -2. Пространственный период замедляющей системы равен 0,2 мм.

6.3. Коэффициент усиления лампы бегущей волны 30 дБ, полоса усиливаемых частот 500 МГц. Мощность входного сигнала 10 мВт. Коэффициент шума ЛБВ 8 дБ. Вычислить мощность собственных шумов на выходе ЛБВ.

6.4. Лампа бегущей волны О-типа работает при напряжении спирали 625 В. Параметр усиления 0,07. Затухание локального поглотителя 10 дБ. Длина замедляющей системы 20 см, а частота усиливаемого сигнала 2,5 ГГц. Вычислить коэффициент усиления ЛБВ.

6.5. Лампа бегущей волны усиливает малый сигнал. В таблице приведены полученные при измерениях значения напряжения U спирали, соответствующие наибольшему усилению на разных частотах f .

U , В	500	505	510	520	540	560	600
f , ГГц	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1

Рассчитать и построить на графике дисперсионную характеристику усилителя на лампе бегущей волны. Сделать выводы о характере дисперсии. Объяснить, почему дисперсия влияет на полосу усиливаемых частот.

6.6. В приведенной ниже таблице приведены результаты измерений. Видно, что при изменении напряжения U первого анода лампы бегущей волны ток луча I изменяется.

U , В	31	41	57	65	76	100
I , А	1	1,5	2,5	3	4	5

Рассчитать и построить модуляционную характеристику усилителя на ЛБВ (зависимость выходной мощности усилителя от напряжения первого анода) при входной мощности 100 мВт. Частота, на которой проводились измерения, равна 2 ГГц; длина замедляющей системы 28 см; сопротивление связи 25 Ом; затухание локального поглотителя 4 дБ. Постоянное напряжение на замедляющей системе 10 кВ. Привести эскиз конструкции ЛБВ.

6.7. При экспериментальном исследовании параметров усилителя на лампе бегущей волны были получены следующие значения параметров: ток спирали 0,2 мА; ток коллектора 8 мА; напряжение спирали 500 В; напряжение коллектора 800 В. Выходная мощность при этом составила 1 Вт. Вычислить коэффициент полезного действия усилителя. Привести схему лампы бегущей волны.

6.8. Лампа обратной волны типа О работает в основной зоне генерации. Дисперсионная характеристика замедляющей системы длиной 12,3 см линейна в частотном интервале от 2 ГГц до 3 ГГц, причём на частоте 2,5 ГГц фазовая скорость равна $15 \cdot 10^6$ м/с, а крутизна дисперсионной характеристики 10^4 м/(с·МГц). Вычислить и построить график частоты генерации ЛОВ от ускоряющего напряжения в пределах линейного участка дисперсионной характеристики.

6.9. Определить коэффициент усиления лампы бегущей волны типа О в линейном режиме при следующих параметрах. Частота 4 ГГц; ускоряющее напряжение 750 В; ток луча 20 мА; сопротивление связи замедляющей системы 100 Ом; длина замедляющей системы 6 см. Затухание локального поглотителя 8 дБ. Полагая, что мощность входного сигнала 4 мВт, вычислить выходную мощность и КПД усилителя.

6.10. Исходными уравнениями теории приборов с длительным взаимодействием являются: уравнения движения Лоренца; уравнения Максвелла и закон сохранения заряда. Записать эти уравнения, пояснить все употребляемые обозначения, указать размерности используемых величин в системе единиц СИ.

6.11. Вместо того чтобы использовать уравнения Максвелла для вычисления полей в каждой конкретной замедляющей структуре, удобнее использовать модель эквивалентной передающей линии. В случае одного вида колебаний процессы в замедляющей структуре описывают телеграфными уравнениями:

$$\frac{\partial U}{\partial z} + RI + L \frac{\partial I}{\partial t} = 0,$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} + GU + C \frac{\partial U}{\partial t} = 0.$$

Пояснить все используемые в этих уравнениях обозначения, указать их размерности. Пояснить физический смысл телеграфных уравнений. Записать начальные и граничные условия.

6.12. При исследовании траекторий электронов используют систему независимых переменных Эйлера и систему независимых переменных Лагранжа. В системе Эйлера в качестве независимых переменных берут пространственную координату z и время t , тогда как в переменных Лагранжа используют переменную z и время вхождения заряда в данную область взаимодействия t_0 . Объяснить, в каких случаях целесообразно переходить от системы Эйлера к системе Лагранжа.

6.13. Использование системы переменных Лагранжа позволяет записать закон сохранения заряда в виде

$$\rho(z, t) dz = \rho(z_0, \tau) dz_0.$$

Объяснить, какие величины входят в это равенство, указать их размерности. Пояснить физический смысл этого равенства.

7. Приборы магнетронного типа

7.1. Частотная модуляция магнетрона, настраиваемого напряжением, выполняется посредством изменения анодного напряжения. Крутизна электронной настройки 4 МГц/В. Частота линейно зависит от напряжения, причём при напряжении 1 кВ частота 2 ГГц. Вычислить пределы изменения модулирующего напряжения, требуемого для изменения частоты генерации в пределах от 2 до 6 ГГц. Изобразить устройство митрона и объяснить его работу.

7.2. В магнетроне восемь резонаторов, а отношение ёмкости между сегментом анода и катодом к эквивалентной ёмкости одиночного резонатора равно 0,1. Собственная частота каждого из восьми резонаторов равна 10 ГГц. Определите частоты всех видов колебаний, поясните их физический смысл.

7.3. Вычислить потенциал синхронизации и пороговое напряжение магнетрона, работающего на частоте 10 ГГц при индукции магнитного поля 0,25 Т. В магнетроне 8 резонаторов, возбуждаются π -колебания. Радиус анода магнетрона 1 см, радиус катода 0,8 см.

7.4. Оценить электронный КПД и полный КПД магнетрона, полагая, что электронный КПД равен КПД одиночного электрона. Анодное напряжение 12 кВ. Собственная добротность колебательной системы магнетрона 1000, нагруженная добротность 100. КПД одиночного электрона вычислить исходя из того, что при ударе об анод электрон имеет скорость $4 \cdot 10^7$ м/с. Дать определения понятий: «электронный КПД магнетрона», «полный КПД магнетрона». Изобразить устройство магнетрона и объяснить, как он работает.

7.5. Экспериментально установленная зависимость полного фазового сдвига замедляющей системы из десяти ячеек оказалась линейной в диапазоне частот от 1,2 до 1,5 ГГц. На крайних частотах полный фазовый сдвиг составляет соответственно 410° и 610° . Фазовый сдвиг в пространстве взаимодействия, отсчитываемый в направлении распространения электронного потока, определяется как разность $(180^\circ - \theta)$, где θ – фазовый сдвиг, приходящийся на одну ячейку. Анодный блок амплитрона состоит из одиннадцати таких ячеек. Оценить полосу усиливаемых амплитроном частот. Изобразить устройство амплитрона и объяснить, как он работает.

7.6. В магнетроне восемь резонаторов. Отношение ёмкости между одним сегментом и катодом к эквивалентной ёмкости одиночного резонатора 0,2. Собственная частота одиночного резонатора 10 ГГц.

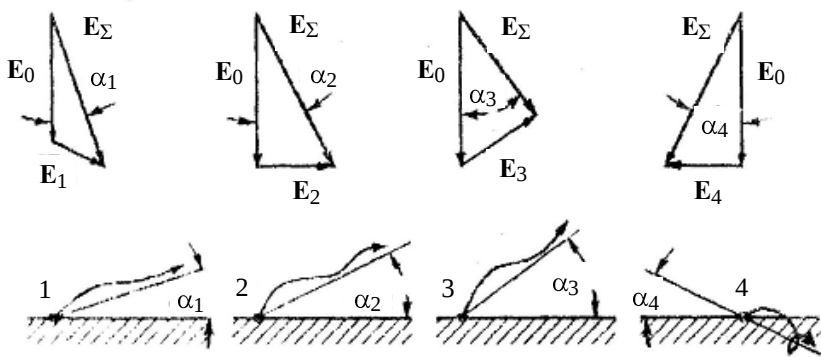
Определить частоты всех видов колебаний. Привести принципиальную схему магнетрона вместе с измерительными приборами.

7.7. Радиусы анода и катода многорезонаторного магнетрона равны соответственно 4,4 и 2,6 мм. Вычислить и построить график параболы критических режимов для этого магнетрона.

7.8. В лампе бегущей волны типа М при отсутствии входного сигнала электроны под воздействием электрического поля 100 кВ/м и индукции постоянного магнитного поля 0,25 Тл движутся параллельно поверхности холодного катода. Вычислить скорость электронов при влёте в пространство взаимодействия. Изобразить устройство ЛБВ типа М.

7.9. Анодное напряжение магнетрона 500 В. Диаметр катода 1 мм, диаметр анода 2 мм. Оценить величину индукции постоянного магнитного поля, при которой вылетающие из катода с нулевой скоростью электроны достигнут анода, имея нулевую тангенциальную составляющую скорости. Изобразить траекторию электрона.

7.10. Пользуясь приведенными ниже рисунками, пояснить процесс группировки и сортировки электронов в пространстве взаимодействия многорезонаторного магнетрона.



В верхней строке изображены векторы напряжённостей электрического поля, в нижней – траектории электронов, попадающих области с разными мгновенными значениями суммарного электрического поля $E_\Sigma = E_0 + E_n$. Здесь E_0 – вектор напряжённости постоянного электрического поля, E_n – вектор напряжённости тангенциальной составляющей. В нижней строке рисунка показаны траектории электронов вблизи катода. Заштрихованные области соответствуют поверхности катода.

7.11. Вычислить разность фаз колебаний в соседних резонаторах магнетрона при номерах видов колебаний от 0 до 7. В магнетроне всего восемь одинаковых резонаторов. Какие из этих видов используются на практике и почему? Перечислить методы увеличения разделения резонансных частот магнетрона, указать области их применения и привести эскизы соответствующих конструктивных элементов.

7.12. Рассчитать пороговое напряжение и потенциал синхронизации многорезонаторного магнетрона при следующих параметрах: число резонаторов в анодном блоке 18; диаметр анода 9,6 мм; диаметр катода 6,1 мм; напряжённость магнитного поля 6 кЭ; рабочая частота 9,4 ГГц. Дать определения понятий: пороговое напряжение, потенциал синхронизации. Изобразить параболу критических режимов, указать на диаграмме пороговое напряжение и потенциал синхронизации.

7.13. Записать векторное уравнение движения электрона в постоянных скрещённых электрическом и магнитном полях. Составить скалярные уравнения движения в декартовой системе координат. Привести начальные условия. Предложить метод решения системы скалярных уравнений.

7.14. Изобразить траектории движения электрона в скрещённых постоянных полях. Указать механическую аналогию: траектории точек на ободе колеса.

8. Спонтанное и индуцированное излучение

8.1. Шумовая температура мазера составляет 4 К. Вычислить коэффициент шума усилителя в децибелах. Чем обусловлен уровень шума в квантовых приборах?

8.2. Рассчитать отношение населённостей уровней CO_2 . При этом учесть, что энергетический зазор между уровнями соответствует излучению CO_2 лазера на длине волны 10,6 мкм.

8.3. Населённости верхнего уровня и нижнего уровня равны соответственно $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и $1,98 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а частота квантового перехода между этими уровнями составляет 0,1 ТГц. Вычислить температуру квантового перехода.

8.4. В астрономии полную энергию, излучаемую источником в единицу времени, называют светимостью. Известно, что светимость Солнца равна $3,86 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$. Перевести светимость Солнца в мощность, выраженную в гигаваттах. Оценить массу, теряемую Солнцем при такой светимости за год.

8.5. Согласно современным научным представлениям, подтверждённым многочисленными экспериментами, любое излучение состоит из отдельных квантов. Рассчитать и построить график энергии отдельного кванта от частоты излучения. Диапазон частот (или длин волн) – от инфракрасного до ультрафиолетового цвета.

8.6. При поглощении или отражении фотоны, благодаря наличию у них импульса, создают давление. Основываясь на представлении о корпускулярной природе фотона, получить формулу для импульса фотона. Используя эту формулу, рассчитать и построить зависимость импульса фотона для интервала длин волн видимого света.

8.7. Эффект Комптона является доказательством корпускулярной природы фотона. Суть эффекта Комптона состоит в том, что при столкновении фотона с покоящимся электроном часть энергии и импульса фотона передаётся электрону, а длина волны фотона увеличивается. Сдвиг длины волны $\delta\lambda$ всегда положительный и равен

$$\delta\lambda = (h/mc) (1 - \cos \theta),$$

где θ – угол рассеяния света, c – скорость света, m – масса электрона, h – постоянная Планка. Величина $\lambda_C = h/mc$ называется комптоновской длиной волны. Рассчитать величину λ_C и сдвиг длины волны при рассеянии света назад ($\theta = 180^\circ$). Предложить, исходя из возможности из-

мерить сдвиг длины волны, диапазон волн, который следовало бы использовать в эксперименте.

8.8. Вычислить количество фотонов, излучённых лазером, работающим на длине волны 337 нм в течение импульса с энергией 1 мДж.

8.9. Пользуясь формулой Планка, рассчитать плотность энергии излучения с длиной волны 500 нм, испускаемого абсолютно чёрным телом при температуре 1000 К. Полагая, что среднее время жизни частиц в возбуждённом состоянии 10^{-8} с, определить коэффициенты Эйнштейна для спонтанного и индуцированного излучений.

8.10. Рассчитать относительную населённость (в логарифмическом масштабе) уровней неона, находящегося в состоянии термодинамического равновесия, для двух значений температуры: 300 и 1000 К. Значения энергии уровней принять равными 20,61; 20,29; 19,78; 18,70; 16,62 эВ. Построить графики рассчитанных зависимостей. Изобразить устройство и объяснить принцип действия гелий-неонового лазера.

8.11. Для условий термодинамического равновесия вычислить относительную разность населённостей уровней в кристалле трёхуровневого парамагнитного усилителя, работающего на частоте 9 ГГц с частотой накачки 23 ГГц при двух значениях температуры рабочего вещества: 4 и 300 К. Определить отношение разности населённостей при охлаждении кристалла от 300 до 4 К. Объяснить, зачем надо охлаждать кристалл, используемый в парамагнитном усилителе?

8.12. Вычислить относительную разность населённостей уровней ионов хрома в кристалле рубина, используемом для генерации света на волне 6943 Å. Привести эскиз конструкции лазера на рубине и объяснить, как он работает.

8.13. Вычислить отношение часто парамагнитного резонанса при значении фактора Ланде, равном 2.

8.14. Вычислить равновесную разность населённостей, отнесённую к суммарной населённости двух уровней, приняв во внимание, что аргонный лазер работает на длине волны 0,488 мкм.

8.15. Вычислить коэффициент усиления среды на частоте рабочего перехода. Известно, что коэффициент преломления среды равен 1,5. Ширина линии 330 ГГц. Инверсия населённостей $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

8.16. Вычислить коэффициент усиления среды парамагнитного кристалла на резонансной частоте 25 ГГц. Ширина линий рабочего перехода 100 МГц, инверсия населённостей $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, коэффициент преломления 1,8.

8.17. Оценить добротность линии рабочего перехода среды парамагнитного кристалла на резонансной частоте 25 ГГц. Ширина линий рабочего перехода 100 МГц, инверсия населённостей $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, коэффициент преломления 1,5.

8.18. Космический корабль освещает путь лазером, излучающим свет с длиной волны 0,43 мкм. Вычислить скорость корабля, при которой свет станет невидимым для наблюдателя. Корабль движется навстречу наблюдателю.

8.19. Рассчитать четыре зависимости плотности электромагнитного излучения в полости от частоты для фиксированных температур: 3000, 4000, 5000 и 6000 К. Полость находится внутри куска железа, которое имеет постоянную температуру. Внутри полости находится вакуум. При расчётах принять, что количество электромагнитной энергии, отдаваемой стенками в полость, равняется количеству энергии, поглощаемой стенками из полости. Иными словами, для каждой длины волны устанавливается равновесие для электромагнитного излучения. Расчёт выполнить в диапазоне частот от 0 до 10^{15} Гц с интервалом в 10^{14} Гц.

8.20. Вселенная заполнена миллиметровыми волнами, которые можно рассматривать как фотонный газ с плотностью около 500 частиц в 1 см^3 . Вычислите температуру реликтового излучения.

8.21. Среднее время пребывания атома в возбуждённом состоянии 10^{-9} с. Оценить ширину энергетического уровня, пользуясь принципом неопределённости.

9. Приборы квантовой электроники

9.1. Вычислить расстояние, на котором мощность лазерного пучка, распространяющегося по оптическому волокну, уменьшается в 10 раз. Коэффициент потерь волокна равен 0,2 дБ/км.

9.2. Лазер излучает импульс длительностью 0,1 мс. Энергия импульса 0,4 Дж. Поперечное сечение луча – круг диаметром 5 мм. Вычислить объёмную плотность энергии, переносимой импульсом, значение электрического поля и давление излучения при нормальном падении на экран (при различных коэффициентах отражения экрана: 0; 0,2; 0,4; 1).

9.3. Вывести формулу для числа типов ΔN собственных колебаний резонатора Фабри–Перо длиной l в интервале изменения Δk , где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число. Вычислить ΔN для конкретных численных значений: $l = 0,5$ м и $\Delta k = \pi \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$.

9.4. Резонатор лазера образован двумя плоскими зеркалами с коэффициентами отражения 0,8 и 0,75. В резонатор внесли пластинку с коэффициентом поглощения 0,8. Толщина пластинки пренебрежимо мала по сравнению с расстоянием между зеркалами. Во сколько раз надо увеличить коэффициент квантового усиления среды, чтобы условие баланса амплитуд сохранилось при внесении в резонатор поглощающей ячейки.

9.5. Вывести формулу, устанавливающую связь между коэффициентом поглощения α , выраженным в обратных метрах, и коэффициентом поглощения, выраженным в децибелах, деленных на метр (дБ/м). Пользуясь полученной формулой, вычислить значения α [м^{-1}] для трёх типов стекловолокна с поглощением соответственно: 0,5; 5 и 50 дБ/м. При выводе формулы исходить из выражения для мощности волны $P(z) = P(0)e^{-\alpha z}$, где z – расстояние.

9.6. В полупроводниковом лазере роль оптического резонатора выполняют две гладкие противоположные грани кристалла, расстояние между которыми равно 0,8 мм. Отражение от поверхности каждой грани составляет 80 %. Коэффициент распределённых потерь в активном слое полупроводника $0,2 \text{ см}^{-1}$; дифракционные потери составляют 0,02. Определить минимальное значение коэффициента квантового усиления, при котором возможна генерация. Изобразить конструкцию полупроводникового лазера.

9.7. Объём рубинового кристалла лазера 8 см^3 , а плотность ионов хрома в рубине 10^{19} см^{-3} . Время жизни активных частиц на верхних

рабочих уровнях $3 \cdot 10^{-3}$ с. Средняя частота диапазона поглощения рубином света ксеноновой лампы, используемой для накачки, равна $6 \cdot 10^{14}$ Гц. Для возбуждения лазера надо перевести на верхние уровни не менее половины ионов хрома. Считая КПД лампы равным 98 %, вычислить минимальную мощность, необходимую для накачки лазера. Привести эскиз конструкции рубинового лазера и объяснить, как он работает.

9.8. Вычислить коэффициент усиления и ширину полосы усиления квантового парамагнитного усилителя бегущей волны. Известны значения следующих параметров: центральная частота 3 ГГц; ширина линии парамагнитного резонанса 100 МГц; магнитная добротность 100; коэффициент замедления волны 150, длина замедляющей системы 10 см; потери в замедляющей системе 6 дБ. Изобразить устройство квантового парамагнитного усилителя бегущей волны, объяснить его работу.

9.9. Вычислить доплеровское уширение спектральных линий (красное и инфракрасное излучение) для гелий-неонового лазера. Изобразить: устройство гелий-неонового лазера, схему энергетических уровней гелия и неона, зависимость выходной мощности лазера от тока разряда. Указать рабочие переходы, объяснить работу гелий-неонового лазера, учитывая квантовые переходы.

9.10. Перестройка частоты квантового парамагнитного усилителя в диапазоне частот от 6 до 6,8 ГГц выполняется с помощью магнитного поля. Определить требуемый диапазон изменения индукции магнитного поля. Изобразить схему квантового парамагнитного усилителя, объяснить его работу, привести значения параметров.

9.11. Вычислить энергию, импульс и плотность потока фотонов в монохроматическом свете с длиной волны 500 нм и интенсивностью излучения 1 Вт/см^2 . Оценить давление излучения на зеркало, полностью отражающее свет.

9.12. Граничные частоты видимого света равны $5 \cdot 10^{14}$ Гц и 10^{15} Гц. Вычислить длины волн, соответствующие этим частотам, выраженные в ангстремах ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$).

9.13. Длина кристалла рубина, используемого в лазере, равна 10 см, а коэффициенты отражения торцевых поверхностей 0,95 и 0,9. Коэффициент распределённых потерь в рубине $0,001 \text{ см}^{-1}$, дифракционные потери на торцах 0,02. Вычислить коэффициент квантового усиления рубина. Привести энергетическую диаграмму рубина. Изобразить устройство и объяснить работу лазера на рубине.

9.14. Отражающие поверхности открытого резонатора лазера на рубине равны соответственно 0,95 и 0,8. Дифракционные потери резонатора составляют 1 %. Коэффициент квантового усиления рубина равен $5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$, а коэффициент распределённых потерь 10^{-3} см^{-1} . Вычислить минимальную длину кристалла рубина, используя который можно сделать лазер. Привести схему лазера на рубине и объяснить, как он работает.

9.15. Рассчитать энергию и мощность излучения рубинового лазера с кристаллом длиной 5 см и диаметром 1 см, полагая, что излучение происходит в течение интервала времени, пока сравнятся населённости рабочих уровней. В начале генерации населённость верхнего уровня $8,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, населённость нижнего уровня $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Лазер работает на длине волны 6943 Å. При вычислениях считать, что мощность излучения остаётся постоянной в течение 0,1 мкс, а затем спадает до нуля. Изобразить устройство лазера на рубине и энергетическую диаграмму ионов Cr.

9.16. Длина волны излучения лазера изменяется относительно 0,5 мкм изменением длины резонатора Фабри–Перо. Для этого зеркала резонатора устанавливаются на магнитострикционных стержнях. Определить необходимое изменение длины резонатора, чтобы смещение частоты было 1 МГц. При резонансной длине волны 0,5 мкм длина резонатора составила 1 дм.

10. Методы создания электронной аппаратуры

10.1. Для современной элементной базы справедлива зависимость, которую называют правилом Рента:

$$n = kN^R.$$

Здесь n – количество выводов микросхемы, k – среднее число межсоединений, приходящихся на один логический элемент микросхемы, N – количество логических элементов, R – коэффициент Рента. Рассчитать две зависимости количества выводов микросхемы от N при $k = 4$. В качестве параметра рассчитанных зависимостей принять значения R равными 0,5 и 0,75. Сделать выводы.

10.2. Прежние технологии сборки электронных модулей основывались на монтаже выводов компонентов в металлизированные отверстия (PTH – Plated Through Hole). Современные технологии основаны на установке и пайке компонентов на поверхность (SMT – Surface Mounted Technology). Компоненты, предназначенные для SMT-технологий, называют SMD-компонентами (Surface Mounted Device). Перечислите достоинства и недостатки PTH-технологий и SMT-технологий. Какие факторы надо принимать во внимание при выборе конфигурации технологической линии?

10.3. Дать описание следующих поверхностно монтируемых изделий: чип-резисторы, резисторы MELF (Metal electrode face resistors – резисторы с жёсткими торцевыми выводами), чип-конденсаторы, чип-индукторы. Привести эскизы конструкций и особенности производства.

10.4. При проектировании производственных помещений необходимо учитывать, что силовые кабели, трансформаторы и прочее могут служить источниками магнитного поля. Имеется ряд значений магнитной индукции: 0,5 Гс, $5 \cdot 10^{-4}$ Тл, 0,05 Гс, 8 Тл. Составьте таблицу соответствия перечисленных значений и определений: индукция магнитного поля в тоннеле большого адронного коллайдера, магнитное поле у поверхности Земли, безопасный уровень магнитного поля для жизни и здоровья человека, допустимая величина магнитной индукции на участках тестирования и лабораторного анализа.

10.5. Электростатический заряд, образовавшийся на поверхности, может вызывать повреждение и разрушение полупроводниковых структур электронных компонентов и вносить сбои в работу микроэлектронного оборудования. Назовите причины возникновения статического электричества и способы борьбы с ним.

10.6. Рекомендации по конструированию печатных плат применительно к автоматизированной сборке включают в себя, в частности, следующие положения.

- Соблюдать требования российских стандартов (например, ГОСТ 23751) и стандартов МЭК по конструированию плат для поверхностного монтажа.
- Зазор между выводами компонента и стенкой отверстия для монтажа составляет 0,2...0,3 мм.
- Предельные отклонения расстояний между центрами монтажных отверстий и отверстия для сборки не превышают $\pm 0,05$ мм, между осями контактных площадок $\pm 0,1$ мм.
- Минимальное расстояние между контактными площадками соседних SMD-компонентов не менее 1 мм.
- Чип-компоненты располагать не ближе 3 мм от выводов корпусов микросхем.
- Компоненты одного типонаминала располагать на одной стороне платы.

Дать обоснование этим рекомендациям. Перечислить в дополнение к указанным требованиям ещё несколько.

10.7. Для изготовления биполярных транзисторов СВЧ обычно используют кремний. Основными технологиями изготовления биполярных транзисторов СВЧ в настоящее время являются:

- планарно-диффузионная технология;
- изопланарная технология.

Перечислить основные процессы, используемые в этих технологиях. Указать достоинства и недостатки каждой из них.

10.8. Для изготовления полевых транзисторов СВЧ используют арсенид галлия. Так как требуется наибольшая подвижность носителей, то канал выбирают *n*-типа. Перечислить основные технологические методы, используемые при изготовлении полевых транзисторов СВЧ. Особо отразить использование эпитаксии, фотолитографии, ионного легирования, электролитографии.

10.9. Монолитные интегральные схемы СВЧ классифицируют по следующим типам: узлы схемы, функциональные блоки, многофункциональные подсистемы. Перечислить составляющие каждого из этих типов.

10.10. Составить перечень основных принципов разработки интегральных схем СВЧ на арсениде галлия.

10.11. Перечислить параметры, характеризующие шумовые свойства полевых транзисторов.

10.12. Рассмотреть методы изготовления индуктивных элементов в диапазоне СВЧ.

10.13. Известны следующие методы согласования импедансов на СВЧ: согласование с помощью активных элементов, согласование с помощью обратной связи, согласование с помощью пассивных элементов. Рассмотреть особенности этих методов и сравнить их друг с другом.

10.14. Гетероструктуры могут изготавливать с помощью следующих технологий: жидкофазная эпитаксия (liquid-phase epitaxy, LPE), молекулярно-лучевая эпитаксия (molecular beam epitaxy, MBE) и газовая эпитаксия из паров металлоорганических соединений. Сравнить эти технологии и указать, какая из них является самой практичной, допускающей комбинирование широкого круга полупроводниковых материалов, а также позволяет осуществлять контроль состава соединений практически на уровне одного атомного слоя. В результате экспериментально можно реализовать любую зонную структуру.

11. Гетероструктуры

11.1. Вычислить ширину полосы частот излучения на уровне 0,5 двух источников:

- *GaAlAs* – лазер, имеющий ширину спектральной линии 3 нм при средней длине волны излучения 0,82 мкм;
- *InGaAsP/InP* – светодиод с шириной спектральной линии 110 нм при длине волны 1,55 мкм, соответствующей максимальной мощности излучения.

11.2. Изобразить конструкцию селективно-легированного гетероструктурного полевого транзистора. Перечислить технологические методы его изготовления, принцип действия и отличия между ним и полевым транзистором на арсениде галлия с затвором Шоттки.

11.3. Перечислить достоинства СЛГТ транзистора, реализуемые в устройствах СВЧ.

11.4. Одной из проблем реализации транзисторных усилителей СВЧ является стабилизация смещения усилительного каскада, собранного по схеме с общим эмиттером. Привести варианты используемых схем смещения, объяснить их принцип действия.

11.5. Значение гетероструктур для современных информационных технологий, по мнению Ж.И. Алфёрова, состоит в следующем.

- «Гетероструктуры – новый тип полупроводниковых материалов; дорогой, сложный химически и технологически, но наиболее эффективный.

- Используемые гетероструктуры: ДГС-лазер – основной прибор современной оптоэлектроники; гетероструктурный фотодиод – самый эффективный и быстродействующий фотодиод; оптоэлектронные интегральные схемы: только с их помощью можно решить проблему высокой информационной плотности оптических систем связи.

- Быстродействующая микроэлектроника будет создаваться, главным образом, на основе гетероструктур.

- Высокотемпературная быстродействующая силовая электроника – новая обширная область применения гетероструктур.

- Гетероструктуры в преобразовании солнечной энергии: самые дорогие солнечные элементы и самый дешёвый производитель электрической энергии.

- В XXI веке гетероструктуры оставят гомопереводам в электронике только 1 %».

Привести примеры использования гетероструктур со ссылками на источники информации. Сделать комментарий к приведенной цитате нобелевского лауреата Ж.И. Алфёрова.

11.6. При изготовлении гетероструктур необходимо использовать материалы с одинаковыми параметрами решётки. Объяснить, какие отрицательные последствия могут произойти в гетероструктуре, если два материала с различающимися постоянными решётки выращены один на другом.

11.7. При наличии двух полупроводников в составе гетероструктуры имеются три варианта взаимного расположения зон: раздвижка зон, ступенчатое расположение зон и разрыв энергетической щели. Привести изображения зон для этих трёх случаев. Пояснить, в каких приборах они имеют применение. Как экспериментально определить наличие разрывов зон?

11.8. Наиболее известны следующие типы полупроводников.

- Элементарные полупроводники.
- Бинарные соединения.
- Окислы.
- Слоистые полупроводники.
- Магнитные полупроводники.
- Органические полупроводники.
- Полупроводники, не попавшие в предыдущие категории. Многие из этих полупроводников обладают интересными свойствами, но пока что не получили широкого применения. Таким образом, область физики полупроводников имеет огромный простор для расширения.

Привести примеры каждой из перечисленных категорий полупроводников, указать их свойства и области использования.

11.9. Привести в соответствие термины и определения из таблицы.

<i>Термин</i>	<i>Определение</i>
Гетеропереход	Структура, в которой в результате рассогласования постоянных решётки у подложки и нанесённого на неё слоя появляется деформация
Плотность состояний	Одномерная наноструктура
Квантовая проволока	Структура, состоящая из периодически повторяющихся слоёв, толщина которых достаточна, чтобы исключить возможность туннелирования
Квантовая точка	Переход между одним и тем же материалом, но с разным легированием

Окончание таблицы

<i>Термин</i>	<i>Определение</i>
Сверхрешётка с напряжёнными слоями	Число разрешённых состояний на единицу энергии, лежащих в некотором интервале энергии; это число можно вычислить теоретически и измерить экспериментально
Множественно повторяющаяся квантовая яма	Кристаллит с нанометровыми размерами Два материала, выращенные друг на друге, с почти равными постоянными решёток, но разной шириной запрещённой зоны

11.10. Примеры из одномерной математической физики (резонансное туннелирование, поверхностные состояния Тамма, зоны Кронига–Пенни, осцилляции Блоха и т. д.), которые раньше были упражнениями в учебниках, теперь осуществляются в лабораториях. Пояснить причины, благодаря которым это стало возможным.

12. Нанوفизика и нанoeлектроника

12.1. Оценить массу бозона Хиггса, полагая, что она при определённых условиях соответствует энергии 1 ТэВ. Возможно ли, в принципе, обнаружить бозон Хиггса на теватроне, работающем в фермилабе (США, Техас)?

12.2. Оценить рабочую частоту транзистора с металлической (сверхпроводниковой) базой, представляющей собой слой толщиной 10 нм. В транзисторе с металлической базой отсутствует накопление неосновных носителей. Принцип работы основывается на переносе основных носителей заряда через базу, выполненную из металла или соединения кремния с металлом.

12.3. Термины, физические явления и технологии, используемые в структурах, имеющих размеры порядка нескольких десятков нанометров, отличаются от используемых в микроэлектронике. Указать соответствие между терминами (левый столбец таблицы) и определениями, приведенными в правом столбце.

<i>Термин</i>	<i>Определение</i>
Однослойная углеродная нанотрубка	Геометрическое свойство объекта не совмещаться со своим зеркальным отображением при перемещениях и вращениях
Конфайнмент	Проводимость в баллистическом режиме, определяемая границами между двумерной областью и узким проводящим каналом
Графен	Множество элементов, для которых задана бинарная операция, обладающая свойствами: замкнутость, ассоциативность, существование тождественного преобразования и обратного элемента
Фуллерен	Модификация углерода, кристаллизующаяся в слоистой гексагональной структуре
Хиральность	Сферическая или сфероидальная молекула, составленная из правильных пяти- и шестиугольников с атомами углерода в вершинах; открытие этой углеродной структуры было отмечено Нобелевской премией по химии за 1996 г.
Экситон	Плоский одиночный слой из графита
Сверхрешётка	Складывание зон
Графит	Протяжённая структура в виде цилиндра, полученная при свёртывании плоской гексагональной сетки графита без швов

<i>Термин</i>	<i>Определение</i>
Кондактанс	Связанная пара, состоящая из движущихся около общего центра масс электрона и дырки в твёрдом теле Искусственная периодическая структура, состоящая из чередующихся слоёв двух разных полупроводников с толщинами слоёв около нанометра

12.4. Одной из актуальных задач современной электроники является создание материалов с требуемыми физическими свойствами. Предлагаются различные методы, позволяющие избежать переборов химических составов и оптимизировать решение этой задачи. Одним из эффективных является метод структурного дизайна, когда анализируются закономерности «химический состав – структура – свойство». Дать краткую характеристику принципов конструирования новых приборов, обладающих уникальными свойствами.

12.5. Пояснить идею создания одноэлектронного транзистора. Сформулировать требования к нанотехнологии для массового производства одноэлектронных транзисторов. Перечислить недостатки одноэлектронных транзисторов.

12.6. Перечислить ведущие организации в России, в которых выполняются исследования, направленные:

- на создание технологии и наноприборов с минимальными размерами порядка нескольких нанометров,
- создание технологии и наноприборов с минимальными размерами порядка одного нанометра,
- создание элементной базы твердотельных квантовых компьютеров.

12.7. Сформулировать задачи научного направления, которое получило название «пиктоэлектроника».

12.8. Определить длину волны де Бройля для электрона, прошедшего ускоряющее напряжение $U = 10$ кВ. Вычислить расстояние между электронами в луче с плотностью тока $J = 1$ кА/см². Сравнить расстояние между электронами и длину волны де Бройля. При каких условиях эти две величины будут одинаковыми?

12.9. Построить зависимость длины электронной волны де Бройля от скорости электрона. При вычислениях учитывать релятивистские эффекты.

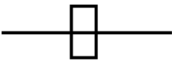
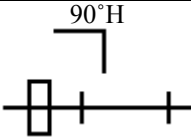
12.10. Для определения концентрации и знака носителей заряда в полупроводниках и металлах используется эффект Холла. Рассмотреть дрейф электронов в прямоугольном бруске, ориентированном длинной стороной вдоль оси x . Магнитное поле направлено по оси z . Изобразить схему для холловских измерений. Вывести формулу для коэффициента Холла.

12.11. Рассмотреть применение эффекта Холла для исследования эпитаксиальных плёнок на непроводящей подложке (метод ван-дер-Пау). Получить выражения для коэффициента Холла и удельного сопротивления образца. При выводе формулы предположить, что все заряженные носители обладают одинаковыми свойствами.

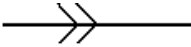
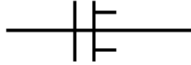
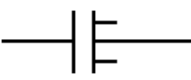
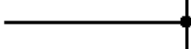
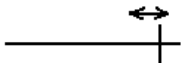
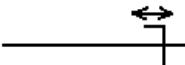
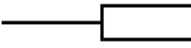
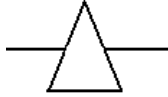
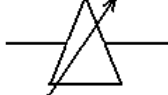
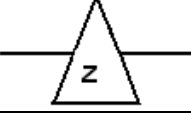
12.12. Оценить коэффициент Холла в случае распределения электронов по энергиям.

12.13. Записать уравнение движения электрона в полупроводнике во внешнем электрическом поле с учётом рассеяния электронов на примесях и фононах. Затем записать уравнение движения в присутствии электрического и магнитного полей. Использовать квазиклассический подход и понятие эффективной массы. Указать, к чему сводится влияние магнитного поля на транспорт заряда.

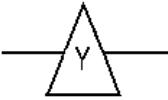
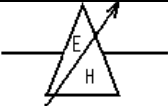
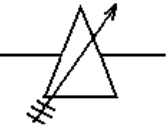
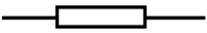
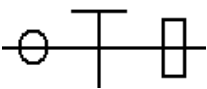
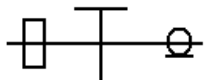
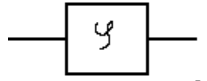
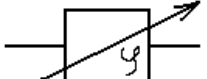
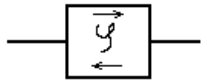
4. ГРАФИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ УСТРОЙСТВ И ПРИБОРОВ СВЧ

Наименование	Обозначение
Волновод:	
прямоугольный	
круглый	
коаксиальный	
Волновод коаксиальный, заполненный диэлектриком	
Волновод спиральный	
Отрезок волновода	
Волновод прямой	
Изгиб волновода (например, прямоугольного) в конструкции:	

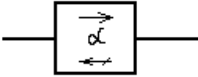
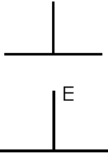
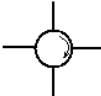
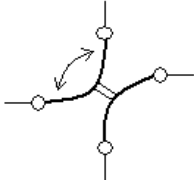
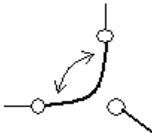
Продолжение таблицы

Наименование	Обозначение
Соединение волноводов: контактное симметричное	
контактное несимметричное	
реактивное без разрыва электрической цепи по постоянному току	
реактивное с разрывом электрической цепи по постоянному току	
Короткозамыкатель	
Короткозамыкатель подвижный:	
контактный	
реактивный	
Нагрузка поглощающая оконечная	
Неоднородность постоянная	
Неоднородность регулируемая	
Неоднородность последовательная	

Продолжение таблицы

Наименование	Обозначение
Неоднородность параллельная	
Устройство согласующее Е-Н	
Устройство согласующее многошлейфное (например, трёхшлейфное)	
Аттенуатор поглощающий: постоянный переменный	 
Переход с одного типа волновода на другой: переход с круглого волновода на прямоугольный переход волноводно- коаксиальный	 
Фазовращатель: нерегулируемый регулируемый	 
Фазовращатель невзаимный	

Продолжение таблицы

Наименование	Обозначение
Вентиль	0,5 дБ/20 дБ 
Соединение волноводов Т-образное. Общее обозначение Например, соединение волноводов Т-образное с указанием плоскости соединения	
Ответвитель направленный: – верхнее число означает переходное затухание, – нижнее- направленность	
Циркулятор: трёхплечный четырёхплечный	 
Переключатель волноводный: на два положения (шаг 90°) на три положения (шаг 120°)	 

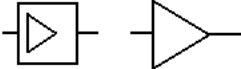
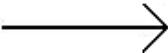
Продолжение таблицы

Наименование	Обозначение
Включение термистора в волноводе	
Включение полупроводникового диода в волновод: непосредственно	
через зонд	
Резонатор: ненастраиваемый	
настраиваемый	
Резонаторы, соединённые отверстием связи	
Включение измерительного прибора (например, измерителя мощности) в волновод	
Частотомер изображают с помощью обозначения резонатора	

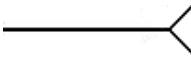
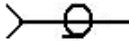
Продолжение таблицы

Наименование	Обозначение
Зонд подвижный, соединенный с волноводом	
Клистрон отражательный с внутренним резонатором и коаксиальным выходом	
Клистрон отражательный с внешним резонатором, коаксиальным выходом и перестройкой частоты	
Магнетрон ненастраиваемый с постоянным магнитом, соединение с волноводным выходом через отверстие связи	
Лампа обратной волны типа О с фокусировкой постоянным магнитом, соединение с волноводным входом и выходом через отверстие связи	
Устройство или функциональная группа	

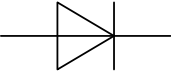
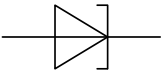
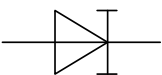
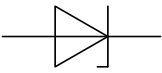
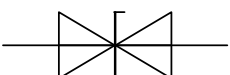
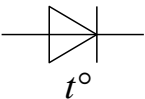
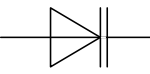
Продолжение таблицы

Наименование	Обозначение
Генератор	
Усилитель	
Генератор звуковых частот	
Генератор пилообразных колебаний	
Генератор прямоугольных импульсов	
Генератор синусоидальных колебаний переменной частоты	
Преобразователь частоты	
Умножитель частоты	
Делитель частоты	
Соединение штепсельное разъёмное, разъём (соединитель) штепсельный	
Штепсель	

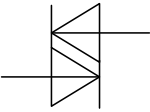
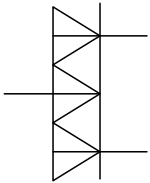
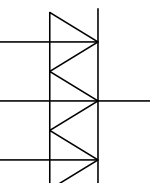
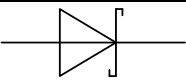
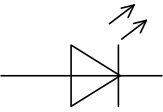
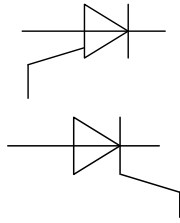
Окончание таблицы

Наименование	Обозначение
Гнездо	
Разъём штепсельный коаксиальный (высокочастотный)	
Гнездовая часть коаксиального разъёма	
Прибор измерительный: показывающий регистрирующий	
Осциллограф	
Термопара. Утолщённая сторона изображения обозначает отрицательную полярность	
Для указания назначения прибора в его обозначение вписывают буквенные обозначения единиц измерения или измеряемых величин, например: амперметр вольтметр ваттметр микроамперметр частотомер волномер фазометр, измеряющий сдвиг фаз	A V W μA Hz λ φ

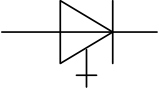
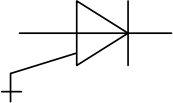
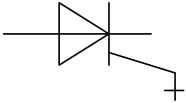
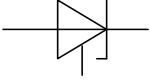
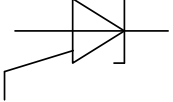
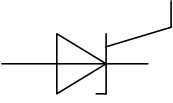
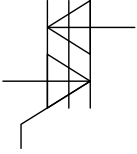
5. ОБОЗНАЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Наименование	Обозначение
Общее обозначение диода	
Диод туннельный	
Диод обращённый	
Стабилитрон (диод лавинный выпрямительный): а) односторонний	
б) двухсторонний	
Диод термоэлектрический	
Варикап емкостной	

Продолжение таблицы

Наименование	Обозначение
Диод двунаправленный	
Модуль с несколькими (например, с тремя) одинаковыми диодами с общим анодным и самостоятельными катодными выводами	
Модуль с несколькими одинаковыми диодами с общим катодным и самостоятельными анодными выводами	
Диод Шоттки	
Диод светоизлучающий	
Тиристор триодный, запираемый в обратном направлении с управлением: по аноду по катоду	

Продолжение таблицы

Наименование	Обозначение
Тиристор триодный выключаемый: общее обозначение	
запираемый в обратном направлении, с управлением по аноду	
запираемый в обратном направлении, с управлением по катоду	
Тиристор триодный, проводящий в обратном направлении: общее обозначение	
с управлением по аноду	
с управлением по катоду	
Тиристор триодный симметричный (двунаправленный) – триак, симистор	

Продолжение таблицы

Наименование	Обозначение
Тиристор тетродный, запираемый в обратном направлении	
Транзистор а) типа $p-n-p$ б) типа $n-p-n$	
Транзистор типа $n-p-n$, коллектор соединён с корпусом	
Транзистор лавинный типа $n-p-n$	
Транзистор однопереходный с n -базой	
Транзистор однопереходный с p -базой	

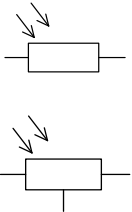
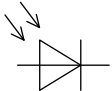
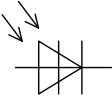
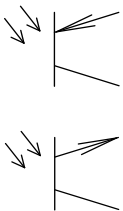
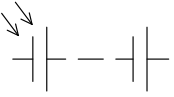
Продолжение таблицы

Наименование	Обозначение
Транзистор двухбазовый типа $n-p-n$	
Транзистор двухбазовый типа $p-n-i-p$ с выводом от i -области	
Транзистор многоэмиттерный типа $n-p-n$	
Транзистор полевой с каналом типа n	
Транзистор полевой с каналом типа p	
Транзистор полевой с изолированным затвором без вывода от подложки: а) обогащённого типа с p -каналом б) обогащённого типа с n -каналом	

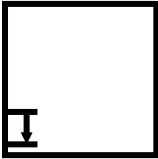
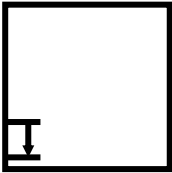
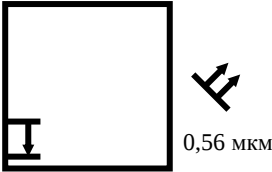
Продолжение таблицы

Наименование	Обозначение
в) обеднённого типа с p -каналом	
г) обеднённого типа с n -каналом	
Транзистор полевой с изолированным затвором обогатённого типа с n -каналом, с внутренним соединением истока и подложки	
Транзистор полевой с изолированным затвором с выводом от подложки обогатённого типа с p -каналом	
Транзистор полевой с двумя изолированными затворами обедненного типа с p -каналом с выводом от подложки	
Транзистор полевой с затвором Шоттки	
Транзистор полевой с двумя затворами Шоттки	

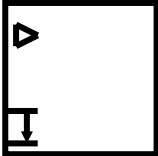
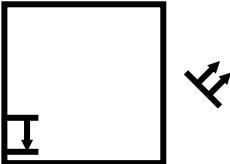
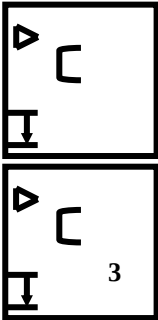
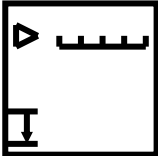
Окончание таблицы

Наименование	Обозначение
Фоторезистор: а) общее обозначение б) дифференциальный	
Фотодиод	
Фототиристор	
Фототранзистор: а) типа $p-n-p$ б) типа $n-p-n$	
Фотоэлемент	
Фотобатарея	

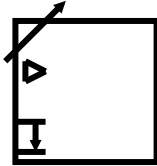
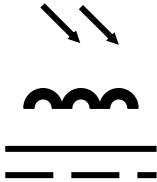
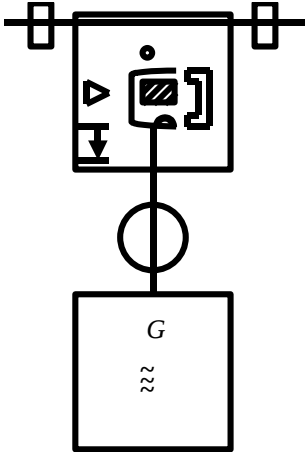
6. ОБОЗНАЧЕНИЯ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ

Наименование	Обозначение
Устройство квантовое сверхвысоко- частотное (мазер)	
Устройство квантовое оптическое (лазер) Примечание. Допускается рядом с обозначением квантовых устройств или в его обозначении указывать частоту, длину волны, температуру, химический состав активного вещества и т. д. Например, квантовое устройство со световым излучением 0,56 мкм	 

Продолжение таблицы

Наименование	Обозначение
Устройство квантовое СВЧ (мазер)	
Устройство квантовое оптическое (лазер)	
Усилитель квантовый резонаторный. Примечание. При обозначении много-резонаторных устройств рядом с изображением резонатора указывают количество резонаторов	
Усилитель квантовый бегущей волны	

Продолжение таблицы

Наименование	Обозначение
Усилитель квантовый перестраиваемый	
Накачка: а) световая б) радиочастотная в) постоянным током	
Усилитель квантовый сверхвысокочастотный с кристаллом в резонаторе с внешним постоянным магнитом, соединенный через отверстие связи с прямоугольным волноводом и через петлю связи в круглый волновод с генератором накачки	

Окончание таблицы

Наименование	Обозначение
Генератор квантовый оптический на рубине со световой накачкой	
Генератор квантовый оптический на рубине с ксеноновой лампой в качестве источника накачки	

7. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИН

Большинство физических величин, с которыми мы имеем дело в научных исследованиях и технических расчётах, характеризуется двумя составляющими: численным значением и единицей измерения. С практической точки зрения желательно использовать единицы, принадлежащие к определённой системе, используемой во всех странах. Такая единая универсальная система единиц физических величин для всех отраслей науки, техники и образования существует. Она принята Генеральной конференцией по мерам и весам (октябрь 1960 г., Париж). Называется международной системой единиц (в русской транскрипции СИ – система интернациональная). В табл. 7.1 указаны основные и некоторые производные единицы СИ.

Таблица 7.1

Международная система единиц (СИ)

Наименование величины	Единица измерения	Обозначение
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Термодинамическая температура	кельвин	К
Количество вещества	моль	моль
Сила света	кандела	кд
Давление	паскаль	Па
Работа, энергия	джоуль	Дж
Мощность	ватт	Вт
Электрический заряд	кулон	Кл
Электрическое напряжение	вольт	В
Напряжённость электрического поля	вольт на метр	В/м
Электрическое сопротивление	ом	Ом
Частота периодического процесса	герц	Гц

Окончание табл. 7.1

Наименование величины	Единица измерения	Обозначение
Удельное электрическое сопротивление	ом-метр	Ом·м
Электрическая проводимость	сименс	См
Электрическая ёмкость	фарада	Ф
Магнитный поток	вебер	Вб
Индуктивность	генри	Гн
Напряжённость магнитного поля	ампер на метр	А/м
Магнитная индукция	тесла	Тл
Электрическая индукция	кулон на квадратный метр	Кл/м ²

Обозначения единиц, наименования которых образованы по фамилиям учёных, пишутся с прописной буквы. Используются также десятичные кратные и дольные единицы, получаемые умножением единиц СИ на один из множителей, выражающийся формулой 10^n , где $n = 18, \dots, -18$.

Таблица 7.2

Приставки и множители для образования кратных и дольных единиц

Приставки	Множители	От какого слова образовано	Из какого языка	Обозначение
экса	10^{18}	шесть (раз по 10^3)	греческий	Э
пета	10^{15}	пять (раз по 10^3)	греческий	П
тера	10^{12}	огромный	греческий	Т
гига	10^9	гигант	греческий	Г
мега	10^6	большой	греческий	М
кило	10^3	тысяча	греческий	к
гекто	10^2	сто	греческий	г
дека	10^1	десять	греческий	да
деци	10^{-1}	десять	латинский	д
санتي	10^{-2}	сто	латинский	с
милли	10^{-3}	тысяча	латинский	м
микро	10^{-6}	малый	греческий	мк
нано	10^{-9}	карлик	латинский	н
пико	10^{-12}	пикколо (маленький)	итальянский	п
фемто	10^{-15}	пятнадцать	датский	ф
атто	10^{-18}	восемнадцать	датский	а

Иногда приходится пользоваться единицами, не установленными СИ. Так, при измерении энергии электрона пользуются электрон-вольт, поскольку энергия джоуль слишком велика по сравнению с энергией электрона. По определению электрон-вольт есть кинетическая энергия электрона, ускоренного из состояния покоя напряжением 1 вольт.

Соотношения между некоторыми единицами физических величин и единицами СИ:

1 электрон-вольт (эВ) равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж;

1 эрг = 10^{-7} Дж;

1 Гс = 10^{-4} Тл;

1 ангстрем (Å) = 10^{-10} м = 10^{-4} мкм;

1 Э = 79,6 А/м.

Широкое применение в физике нашла аддитивная относительная логарифмическая единица – децибел. В акустике децибелы используют в качестве относительной единицы измерения громкости звука. Нулевой уровень соответствует порогу слышимости, т. е. интенсивности звука 10^{-12} Вт/м². Децибелы используют, оценивая силу землетрясений. В этом случае определяют интенсивность землетрясения относительно интенсивности, соответствующей самому слабому землетрясению, которое регистрирует сейсмограф. В радиотехнике децибел стал основной единицей измерений, выражающей относительное усиление или ослабление сигнала, а также используемой для описания отношения сигнала к шуму. В диапазоне сверхвысоких частот децибелы используют в качестве относительной логарифмической единицы мощности. Единица бел составляет десятую часть децибела.

Кратко остановимся на величинах, которые обычно называют константами. Прежде всего, это электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м $\approx 1 \cdot 10^{-9} / 36\pi$ Ф/м, и магнитная постоянная $\mu_0 = 12,566 \cdot 10^{-7}$ Гн/м $\approx 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Скорость света $c = 299792458$ м/с.

К фундаментальным постоянным относят константы, которые определяют взаимодействия в Стандартной модели. Физики насчитывают всего 26 фундаментальных констант. Ниже приведены только некоторые из них.

Абсолютная величина заряда электрона $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл. Масса электрона $m = 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг. Отношение масс протона и электрона $M_p/m = 1836,1$. Постоянная Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Постоянная Больцмана $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Гравитационная постоянная $G = 6,6726 \cdot 10^{-11}$ м³/(кг·с²).

Наиболее важная фундаментальная физической константа – постоянная тонкой структуры α . Она является мерой взаимодействия между заряженными частицами и электромагнитными полями. Это безразмерная величина, равная $\alpha = \mu_0 c e^2 / 2h = 7,297 \cdot 10^{-3} \approx 1/137$.

Из наиболее точных измерений, основанных на использовании эффекта Джозефсона, $\alpha^{-1} = 137,035987(29)$.

Термин «постоянная тонкой структуры» объясняется наличием тонкого расщепления спектральных линий атомов, пропорционального α^2 . Расщепление линий используется для измерения постоянной тонкой структуры. Причиной расщепления является спин-орбитальное взаимодействие.

Согласно квантовой электродинамике постоянная тонкой структуры определяет размер атомов и устойчивость вещества. Если бы α была намного больше, то вещество и излучение менее чётко различались. Тогда как при значительно меньшей величине α вещество не взаимодействовало бы с электромагнитным полем.

Рассмотрим причины, благодаря которым малая величина α определяет устойчивость атомов. Согласно квантовой теории электрон в атоме, находящийся на верхнем уровне, совершает около $1/(\alpha^3 \cdot Z^2)$ колебаний, перед тем как атом испустит один фотон. Из-за этого возбуждённые состояния атомов и молекул метастабильны. Излучение возбуждённым атомом двух фотонов одновременно наблюдается редко по той причине, что вероятность испускания теперь пропорциональна квадрату вероятности испускания одного фотона.

Есть ещё одна разновидность процессов, на которые влияет α , и эти процессы – аннигиляция частиц. Например, электрон и позитрон исчезают, превращаясь в электромагнитное поле. Вероятность аннигиляции электрона и позитрона пропорциональна мере их взаимодействия с электромагнитным полем. Значит, эта вероятность зависит от α , а величина постоянной тонкой структуры определяет интервал времени, в течение которого электрон и позитрон существуют в виде электромагнитного излучения. И если α когда-то была близкой к единице, то излучение и вещество невозможно было различить.

Начиная с 1930-х гг. физики обсуждают переменность (изменчивость) физических констант на космологических масштабах времени. В последние годы появились новые астрофизические измерения, свидетельствующие о том, что относительная переменность массы электрона и постоянной тонкой структуры α составляют порядка 10^{-15} в год. Стабильность относительной величины гравитационной постоянной оценена с точностью до 10^{-14} в год. По современным теориям

величина G уменьшается со временем. Возможно, темп изменения фундаментальных физических постоянных величин был значительным в эпоху Большого взрыва.

Теория переменности фундаментальных констант пока отсутствует. Вместе с тем не исключено, что величины, которые получили название фундаментальных констант, на самом деле изменчивы. Причём вполне возможно, что скорость их изменения не оставалась неизменной. Определив фактическую скорость изменения названных величин, удастся понять эволюцию Вселенной в первые доли секунды после Большого взрыва. Это приведёт к лучшему пониманию физики микро- и наномира. Точное измерение величины гравитационной постоянной имеет большое значение для космологии, так как позволит ответить на вопросы, связанные с расширением Вселенной и уменьшением плотности материи в ней.

Тот факт, что величина α мала, используется для расчёта электромагнитных взаимодействий методом последовательных приближений. В нулевом приближении пренебрегают взаимодействием частиц, в первом приближении учитывают взаимодействие с точностью до слагаемых, пропорциональных α . Затем можно учесть приближения с точностью до членов, пропорциональных α^2 и т. д. Понятно, что именно условие $\alpha \ll 1$ позволяет ограничиться приближениями низших порядков при расчёте эффектов электромагнитного взаимодействия.

Наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности, называется метрологией. Теоретическая метрология рассматривает общие теоретические проблемы. Прикладная метрология изучает вопросы применения методов измерений. Законодательная метрология охватывает общие правила, требования и нормы, нуждающиеся в регламентации и контроле со стороны государства. Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ) занимается вопросами, направленными на обеспечение единства измерений.

Выполняя измерения, следует помнить основные *принципы метрологии*. Во-первых, экспериментальный способ определения величины заключается в том, что принимают одну величину за единицу измерения и сравнивают с ней измеряемую величину. Во-вторых, прежде чем приступать к измерениям какого-либо свойства, характеристики или параметра, необходимо иметь о них какие-нибудь предварительные сведения. И, наконец, в-третьих, на результат измерения оказывают влияние многие факторы. Поэтому, чтобы результаты измерений не оказались случайными, их надо повторить многократно, после чего их математически обрабатывают.

8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Единообразие в названиях диапазонов электромагнитных волн отсутствует. Действительно, согласно определению из Большой советской энциклопедии «сверхвысокие частоты (СВЧ) – это область радиочастот от 300 МГц до 300 ГГц, охватывающая дециметровые, сантиметровые и миллиметровые волны». Тогда как известная энциклопедия Britannica пользуется иной терминологией. Прежде всего, в ней определяется понятие *electromagnetic spectrum* (электромагнитный спектр) как полный диапазон (*range*) частот или длин волн электромагнитного излучения. Он охватывает (в порядке увеличения частоты или уменьшения длины волны): *радиоволны* от очень низкочастотных волн до ультравысокочастотных, *микроволны*, *инфракрасное излучение*, *видимый свет*, *ультрафиолетовое излучение* и *гамма-лучи*. Все волны электромагнитного спектра распространяются с одной и той же скоростью, равной 299792458 м/с. Указанные диапазоны ограничены следующими интервалами частот и соответствующих длин волн.

Длины *радиоволн* определены в интервале от тысяч метров до 30 сантиметров, что соответствует частотам от 3 до 10^9 Гц. *Микроволны* имеют длины волн от 30 см до 1 мм, что соответствует частотам от 1 ГГц до 1 ТГц. Длины волн *инфракрасного излучения* варьируются в пределах примерно от 0,7 мкм до 1 мм. Этот диапазон подразделяют на ближний инфракрасный (0,7 ... 3 мкм), средний инфракрасный (3 ... 20 мкм) и дальний (20 мкм ... 1 мм) диапазоны.

Согласно классификации МСЭ электромагнитный спектр разделён на узкие диапазоны частот, которым присвоены номера и названия. *Чрезвычайно низкие частоты* (*extremely low frequencies*) – диапазон от 30 до 300 Гц. Он включает в себя сигналы с частотами сети 50 и 60 Гц, а также низкочастотные сигналы телеметрии.

Тональные частоты (voice frequencies) – сигналы от 300 Гц до 3 кГц. Канал тональной частоты от 300 до 3400 Гц.

Очень низкие частоты (very low frequencies) – сигналы от 3 до 30 кГц, которые используются для правительственных и военных систем.

Низкие частоты (low frequencies) – сигналы от 30 до 300 кГц. Используются в морской и воздушной навигации.

Средние частоты (medium frequencies) – сигналы в диапазоне от 300 кГц до 3 МГц – используются для коммерческого АМ радиовещания.

Высокие частоты (high frequencies) – от 3 до 30 МГц – используются для двуправленной связи любительскими радиостанциями. Часто их называют короткими волнами.

Очень высокие частоты (very high frequencies) – от 30 до 300 МГц – используют в мобильных радиостанциях, для морской и авиасвязи. Частоты от 88 до 108 МГц используют в коммерческом ЧМ-вещании. Коммерческое телевидение на каналах 2-13 использует частоты от 54 до 216 МГц.

Ультравысокие частоты (ultrahigh frequencies) – от 300 МГц до 3 ГГц – используют коммерческое телевидение на каналах 14-83, мобильная наземная связь, сотовая телефония, радарные и навигационные системы, радиорелейные и спутниковые системы связи.

Сверхвысокие частоты (superhigh frequencies) – от 3 до 30 ГГц – используют в радиорелейных и спутниковых системах связи.

Крайне высокие частоты (extremely high frequencies) – от 30 до 300 ГГц – используют в специализированных приложениях.

Инфракрасный диапазон – электромагнитные волны с частотами от 0,3 до 300 ТГц – представляет собой тепловое излучение и редко используется для связи. Вместе с тем инфракрасные лучи используются в приборах ночного видения, при наведении по тепловому лучу, дистанционном управлении, астрономии, электронной фотографии.

Видимый свет – от 0,3 до 3 ПГц – диапазон волн, видимых человеческим глазом, а поэтому играет важнейшую роль в жизни людей. Кроме того, эти электромагнитные волны используют в волоконно-оптических линиях связи, являющихся основными средствами связи во многих приложениях.

В иностранной литературе часто используются обозначения диапазонов электромагнитных волн, указанные в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Условные обозначения диапазонов СВЧ

Обозначения	Частоты, ГГц	Длины волн, см
<i>L</i>	1 ... 2	30 ... 15
<i>S</i>	2 ... 4	15 ... 7,50
<i>C</i>	4 ... 8	7,5 ... 3,75
<i>X</i>	8 ... 12	3,75 ... 2,50
<i>Ku</i>	12,4 ... 18	2,24 ... 1,67
<i>DBS</i>	17,3 ... 18,1	1,73 ... 1,66
<i>K</i>	18 ... 26	1,67 ... 1,15
<i>Ka</i>	26,5 ... 40	1,13 ... 0,75
<i>Q</i>	33 ... 50	0,91...0,60
<i>U</i>	40 ... 60	0,75...0,50
<i>V</i>	50 ... 75	0,60...0,40
<i>E</i>	60 ... 90	0,50...0,33
<i>W</i>	75 ... 110	0,40...0,27
<i>F</i>	90 ... 140	0,33...0,21
<i>D</i>	110 ... 170	0,27...0,18
<i>G</i>	140 ... 220	0,21...0,14

Актуальной остаётся задача освоения новых для оптоэлектроники диапазонов, в том числе инфракрасного и ультрафиолетового спектров.

В табл. 8.2 указаны интервалы длин волн, принятые в отечественной литературе.

Таблица 8.2

Интервалы длин электромагнитных волн оптического диапазона

Номер интервала	Название	Длины волн
1	Инфракрасный диапазон	400 мкм...760 нм
2	Видимый свет	400 ... 760 нм
2.1	Красный	620 ... 760 нм
2.2	Оранжевый	590 ... 620 нм
2.3	Жёлтый	560 ... 590 нм
2.4	Зелёный	500 ... 560 нм
2.5	Голубой	480 ... 500 нм
2.6	Синий	450 ... 480 нм
2.7	Фиолетовый	400 ... 450 нм
3	Ультрафиолетовый диапазон	2 ... 400 нм

Рентгеновские лучи имеют частоты от 30 до 300 ПГц (петагерц, 10^{15} Гц). К рентгеновскому диапазону примыкает спектр гамма-лучей: (0,3 ... 3 ЭГц, 1 эксагерц равен 10^{18} Гц). Энергия гамма квантов превышает 100 кэВ. Они возникают при квантовых переходах в атомных ядрах и некоторых превращениях элементарных частиц, а также при тормозном и синхротронном излучении. Тормозное электромагнитное излучение возникает в результате торможения (уменьшении скорости) заряженной частицы при взаимодействии с полем ядра или атомарных электронов. Испускание рентгеновских лучей – один из примеров тормозного излучения. Синхротронное (магнитотормозное) излучение возникает при движении в магнитном поле по искривлённым траекториям релятивистских частиц. Причиной магнитотормозного излучения является появляющееся при этом ускорение. Аналогичное излучение нерелятивистских частиц называется циклотронным излучением. Оно происходит на гирочастоте и её гармониках. Чем выше скорость частицы, тем заметнее энергия высших гармоник. В релятивистском пределе излучение наиболее интенсивных гармоник обладает непрерывным спектром и сосредоточено в направлении мгновенной скорости в узком конусе с углом около mc^2/W , где m и W – масса и полная энергия частицы, c – скорость света. Излучение частицы эллиптически поляризовано.

Синхротронное излучение первоначально наблюдалось на ускорителях электронов, называемых синхротронами. Отсюда и получилось название. Сейчас большой практический интерес представляет синхротронное излучение лазеров на свободных электронах. Космические лучи занимают диапазон частот от 3 до 30 ЭГц.

Международная организация по регулированию распределения служб и частот всего электромагнитного спектра – это международный союз электросвязи (МСЭ). В России конкретные номиналы радиочастот, порядок их назначения и условия использования определяет Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ). Функции согласования технических заданий на разработку, утверждение технических условий на серийное производство, оформление разрешений на ввоз из-за границы и реализацию импортных радиоэлектронных средств возложены на Главный радиочастотный центр.

Электромагнитные волны всех диапазонов находят широкое применение в различных областях науки и техники. Самые низкие радиочастоты используют для связи с подводными лодками. Электромагнитные волны СВЧ-диапазона используются в радиолокации, радиона-

вигации, телевидении, радиовещании, спектроскопии, радиоастрономии, ускорителях элементарных частиц, мобильной телефонной связи. СВЧ-техника применяется в различных технологических установках ускоренного разогрева и сушки материалов, в медицине для локальных прогревов тканей. Радиоволны используются в бытовой технике.

В последние десятилетия интенсивно развиваются радиотехнические системы космического базирования. Глобальная радионавигационная система GPS (Global Positioning System) первоначально создавалась для армии США. Впоследствии к ней могли подключаться гражданские пользователи. Она начала эксплуатироваться в 1993 г. и использует несущие частоты *L*-диапазона: 1575,42 и 1227,60 МГц. *Космический сегмент* системы состоит не менее чем из 24 коммуникационных спутников, расположенных на шести орбитах. На борту каждого спутника имеется атомный стандарт частоты, относительный уход которой от номинала в течение суток не превышает 10^{-13} . Спутники используются в качестве маяков, работающих в едином системном времени. Их координаты известны с высокой точностью, а передатчики всех спутников синхронизированы друг с другом. *Контрольный сегмент GPS* состоит из главной станции управления и пяти станций мониторинга, непрерывно следящих за всеми спутниками и измеряющих их координаты, а также передающих данные на главную станцию управления. Главная станция вычисляет положения спутников и передаёт обновлённые данные на станции наземного управления, которые передают данные на спутники GPS по выделенной линии связи *S*-диапазона. *Пользовательский сегмент* состоит из всех приёмников GPS.

Приёмник GPS, приняв сигналы от четырёх спутников, решает четыре уравнения относительно четырёх неизвестных, а именно три координаты и сдвиг временных шкал. В результате приёмник выполняет позиционирование и измерение времени. Точность определения координат может составить от 10 метров до нескольких миллиметров.

Российская система ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система) по многим параметрам сопоставима с GPS. Космический сегмент состоит из 24 навигационных спутников, вращающихся на высоте около 20 км вокруг Земли с периодом обращения 11 ч 15 мин. Используются частоты *L*-диапазона. Совершенствование ГЛОНАСС отнесено к высшим приоритетам России. В целях обеспечения национальной безопасности, повышения эффективности управления движением транспорта, уровня безопасности перевозок пасса-

жиров, совершенствования геодезических и кадастровых работ начиная с 2010 г. страна перейдёт на качественно новую систему определения местоположения. Аппаратурой спутниковой навигации будут оснащены все космические аппараты, самолёты и вертолёты, морские и речные суда, автомобильный и железнодорожный транспорт, перевозящий пассажиров, специальные и опасные грузы. Аппаратура, которую используют при составлении кадастра, будет иметь связь с навигационными спутниками. Для военных ГЛОНАСС работает начиная с 1995 г. Однако теперь аппаратурой ГЛОНАСС или ГЛОНАСС/GPS будет оснащена вся флотская, армейская техника, а также техника силовых ведомств.

В будущем эти и другие системы, такие как европейский проект GALILEO, явятся основой кооперативной всемирной интегрированной навигационной системы GNSS (Global Navigation Satellite System). Многие выпускаемые приёмники можно использовать в системах как GPS, так и ГЛОНАСС.

В заключение этого раздела приведём ещё несколько примеров использования электромагнитных волн. В радиолокационной станции электромагнитные волны СВЧ генерируются магнетроном, который подсоединён к антенне. Магнетрон модулируется короткими импульсами напряжения. В результате антенна радиолокационной станции излучает направленный радиоимпульс. Если на пути сигнала попадается летательный аппарат, незначительная часть энергии радиоимпульса отражается от него и возвращается к антенне радиолокационной станции. Измерив время распространения сигнала к цели и обратно, а также зная направление антенны, компьютер радиолокационной станции вычисляет координаты летательного аппарата.

В микроволновых печах магнетрон работает в непрерывном режиме, а энергия волн СВЧ поглощается молекулами воды, находящимися в продукте. Молекулы приходят в интенсивное движение, и продукт быстро разогревается.

Свойства и возможности электромагнитных волн представляют большой научный и практический интерес для военных специалистов. Непрерывно увеличивается количество военного радиоэлектронного оборудования. Так, в 2008 г. в США завершилась 10-летняя программа, объём финансирования которой составил 2 млрд долл. В её рамках создан комплект армейского обмундирования нового поколения с множеством высокотехнологичных средств, таких как цифровая персональная радиостанция, GPS-навигатор и др. Миниатюрный компью-

терный комплекс в реальном масштабе времени должен информировать солдата о местонахождении «своих» и «чужих». Многофункциональная лазерная установка позволяет повысить точность стрельбы и измеряет расстояние до цели. Шлем оснащён видеокамерой высокого разрешения. Солдаты могут вести онлайн-переговоры в чате, информировать командиров о координатах замеченных целей, передавать изображения различных объектов, при необходимости самостоятельно вызывать врачей. Срок непрерывной работы комплекта составляет 12 ч, масса 4 кг. Этим комплектом экипирована бригада США, дислоцированная в Ираке. Между тем были выявлены серьёзные проблемы со связью. Очень неудобными оказались способ набора текстовых сообщений на крохотной клавиатуре и взаимодействие с системой многоуровневых меню в боевых условиях. Информация о местоположении «своих» и «чужих», а также сведения на персональных компьютерах солдат обновляется слишком медленно – с запаздыванием в 10 с. Снизить эту задержку позволят технологии, которые появятся через десятилетия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Есть много достойных учебников и учебных пособий по электродинамике, микроволновой и квантовой электронике. Некоторые из них [1–4, 8, 10–12] автор включил в список рекомендуемой литературы. Эти учебные пособия или хотя бы некоторые из них студенты обязательно должны использовать при самостоятельной работе.

Развитие науки и научно-технический прогресс предъявляют высокие требования к отбору учебного материала и методам преподавания. Потребность в новых подходах к структурированию теоретических сведений, задач и лабораторного практикума будет всегда. Поэтому считаем целесообразным издание ещё одного учебного пособия, отличающегося от известных рядом, как нам представляется, достоинств.

В данной книге мы постарались осветить развитие микроволновой и квантовой электроники с начала прошлого века вплоть до самых последних достижений, включая гетероструктуры [5], наноэлектронику [11, 12, 18, 19], технологии поверхностного монтажа [16] и современные компоненты микроэлектроники СВЧ [16, 17]. Содержание тем (см. раздел 1) превышает объём материала, который может изучить студент в течение одного семестра. Однако мы исходили из того, что перечисленные темы составляют содержание нескольких дисциплин. Некоторые темы могут изучаться частично или факультативно. Наконец, по отдельным темам заинтересовавшиеся некоторыми проблемами студенты могут выполнять исследовательские работы, используя при этом в качестве основы материалы международных конференций [6, 22] книги [7, 15, 18–20, 23] или изучая оригинальные работы в периодических изданиях, например [5, 21], или в Интернете. Окончательное решение по выбору тем принимает преподаватель в зависимости от возможностей и интересов студентов, а также от рабочей программы данной дисциплины.

Отличительная черта настоящего учебного пособия – большое количество задач разной трудности, тесно связанных с теорией. Работа над задачами обязательна после изучения теоретического материала перед выполнением лабораторных работ. Образцы решения задач можно найти в хорошем сборнике задач [9].

По учебным пособиям [13,14] можно ознакомиться с описанием лабораторных работ по измерению параметров и характеристик электровакуумных и квантовых приборов. Для настоящего издания *была создана новая лаборатория при финансовой поддержке гранта НГТУ.*

Задачей лабораторного практикума является формирование у студентов навыков при выполнении исследований электронных и квантовых приборов, при измерении их параметров и характеристик. В результате выполнения практикума студенты получают представление о методах расчета характеристик и параметров современных приборов, об основных методах измерения характеристик приборов в различных режимах, формах представления измеренных и рассчитанных характеристик. Лабораторные работы позволят студентам познакомиться с измерительной аппаратурой в области СВЧ и оптического диапазонов. Выполнению практической части курса должно предшествовать изучение теоретической части, где студенты получают знания о физических основах работы и методах исследования приборов. Изучение теории, решение задач и выполнение лабораторных работ даст студентам представление об электронных и квантовых приборах, областях их применения, выработает первоначальные навыки экспериментальных исследований, познакомит их с существующим уровнем техники и подготовит к самостоятельному изучению дополнительных разделов микроволновой и квантовой электроники.

Автор выражает глубокую благодарность академику М.М. Лаврентьеву за проявленный интерес к концепции систем с изменяющимися пространственно-временными соотношениями и возможность выступить с несколькими докладами на конференциях в Новосибирске и Ханты-Мансийске, а также признательность моим рецензентам В.П. Разинкину и В.А. Хрусталёву за полезные замечания, позволившие улучшить текст рукописи.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Основная литература

1. *Приборы* физической электроники: учеб. пособие / *А.И. Астайкин, Л.В. Воронина и др.* – М.: Высш. шк., 2008. – 229 с.
2. *Данилов В.С.* Микроэлектроника СВЧ: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 292 с.
3. *Дудкин В.И., Пахомов Л.Н.* Квантовая электроника. Приборы и их применение: учеб. пособие. – М.: Техносфера, 2006. – 432 с.
4. *Мальшиев В.А.* Основы квантовой электроники и лазерной техники: учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 2005. – 542 с.
5. *Разработка* полупроводниковых гетероструктур для быстродействующей электроники и оптоэлектроники. Создание интегральных схем // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172, № 9. – С. 1067–1109.
6. *Садовой Г.С.* Фундаментальные проблемы электроники больших мощностей // Материалы VIII международ. конф. АПЭП-2006. Т. 2. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – С. 133–140.
7. *Садовой Г.С.* Моделирование систем с переменным запаздыванием. – Новосибирск: НГТУ, 1994. – 275 с.
8. *Петров Б.М.* Электродинамика и распространение радиоволн: учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 558 с.
9. Сборник задач по курсу «Электродинамика и распространение радиоволн»: учеб. пособие / *Баскаков С.И., Карташев В.Г., Лобов и др.*; под ред. *С.И. Баскакова.* – М.: Высш. шк., 1981. – 208 с.
10. *Электронные приборы СВЧ*: учеб. пособие / *В.М. Березин, Э.М. Гутцайт, В.П. Марин.* – М.: Высш. шк., 1985. – 296 с.

Дополнительная литература

11. *Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А.* Основы наноэлектроники: учеб. пособие. – М.: Университетская книга; Логос; Физматкнига, 2006. – 496 с.

12. *Драгунов В.П.* Физика твёрдого тела. Основы нанoeлектроники (квантовые проводники и углеродные нанотрубки): учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 108 с.
13. Лазеры: Лабораторные работы для студентов радиотехнического факультета / *Г.С. Садовой*; Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 1986. – 31 с.
14. *Садовой Г.С., Новицкий С.П.* Электроника и микрoeлектроника: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1996. – 37 с.
15. *Кукарин С.В.* Электронные СВЧ приборы: характеристики, применение, тенденции развития. – М.: Радио и связь, 1981. – 272 с.
16. *Медведев А.М.* Сборка и монтаж электронных устройств. – М.: Техносфера, 2007. – 256 с.
17. *Джуринский К.Б.* Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микрoeлектроники СВЧ. – М.: Техносфера, 2006. – 216 с.
18. *Nanoscale science and technology*, R.W. Kelsall, I.W. Hamley, M. Geoghegan, Eds. – England: John Wiley & Sons, 2006. – 456 pp.
19. *Wolf E.L.* Nanophysics and nanotechnology: An introduction to modern concepts in nanoscience. – Wiley-VCH Verlag&Co. RGA, 2006. – 293 pp.
20. *Садовой Г.С.* Концепция систем с изменяющимися соотношениями // В кн.: Поиск математических закономерностей Мироздания: физические идеи, подходы, концепции. – Новосибирск: Изд-во Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН, 2004. – Т. 2. – С. 153–170.
21. *Борисов В.Д., Садовой Г.С.* Метод фрактального анализа временных рядов // Автoметрия. – 2000. – № 6. – С. 10–19.
22. *Sadovoi G.S., Suslova O.V.* About method for numerical modeling of the electron beams dynamics // Proceedings 2008 IEEE Region 8 international conference on computational technologies in electrical and electronics engineering “SI-BIRCON 2008” (July 21-25, 2008). – Novosibirsk, 2008. – P. 360–363.
23. *Формирование радиоэлектроники* (Радиоэлектроника в её историческом развитии) / Отв. ред. В.М. Родионов. – М.: Наука, 1988. – 380 с.

Периодическая литература

Отечественные журналы

- Автoметрия (<http://www.iae.nsk.su/avtometr/mswin>)
- Квантовая электроника (<http://www.kvantum-electron.ru>)
- Прикладная механика и техническая физика (<http://www-psb.ad-bras.nsc.ru/pmtfw.htm>)
- Радиотехника и электроника; (<http://www.maik.rssi.ru>)
- Успехи физических наук (<http://www.ufn.ru>)
- PC WEEK/RE (<http://www.pcweek.ru>)

Зарубежные журналы

- IEEE Communications Magazine (<http://www.comsoc.org>)
- IEEE Journal of Quantum Electronics (<http://www.ieee.org/organizations/society/LEOSjournal>)
- Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника (<http://www.radio.ntu-kpi.kiev.ua>)

Информационные ресурсы Интернета

- <http://www.spsl.nsc.ru> – государственная публичная научно-техническая библиотека (ГПНТБ) Сибирского отделения Российской академии наук
- <http://www.nstu.ru> – Новосибирский государственный технический университет
- <http://www.library.nstu.ru> – научная библиотека Новосибирского государственного технического университета
- <http://www.standart1.ru> – Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии

Приложение

ПРАВИЛА АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

П1. Термины и определения

Балл [франц. *balle* – шар] – цифровая оценка успеваемости студентов.

Балльно-рейтинговая система – система реализации образовательного процесса и мониторинга качества деятельности студентов в НГТУ. Балльно-рейтинговая система позволяет:

- повысить качество подготовки специалистов, обеспечить ритмичность работы студента в течение семестра и объективность оценивания учебных достижений студентов;
- развить самостоятельность и ответственность студентов, умение управлять процессом своего обучения, прогнозировать его результаты;
- предоставить работодателю информацию о выпускнике для содействия его трудоустройству.

Инновация [лат. *innovation* – обновление] – комплекс мероприятий, направленных на внедрение новой техники, технологий, изобретений и т. п.

Компетентностный подход в высшем образовании – метод моделирования результатов обучения и их представления как норм качества высшего образования. Под результатами обучения понимают наборы компетенций, включающие приобретённые студентом знания, понимание и навыки. Содержание учебных планов в терминах компетенций определяет, в сущности, то, что выпускники должны уметь делать по завершении обучения. Компетентностный подход позволяет обеспечить гибкость и автономию в структуре и содержании учебного плана. Компетентностная модель специалиста, ориентированного на сферу профессиональной деятельности, менее жестко привязана к конкретному объекту и предмету труда, что обеспечивает мобильность выпу-

ских в изменяющихся условиях рынка труда. Модель представляет собой описание того, каким набором компетенций должен обладать выпускник вуза, к выполнению каких функций он должен быть подготовлен и какова должна быть степень его готовности к выполнению конкретных обязанностей. Так, компетенции бакалавра по специальности состоят из компетенций, инвариантных к области деятельности, и специальных компетенций. Инвариантными к области деятельности являются социально-личностные, общенаучные, профессиональные, экономические и организационно-управленческие компетенции, а специальные компетенции разрабатываются применительно к области деятельности для конкретных направлений и специальностей. Применительно к сфере деятельности «техника и технология» описываются такие компетенции, как производственно-технологические, расчетно-проектные, экспериментально-исследовательские, эксплуатационные и т. д. Компетенциями более высокого уровня в области решения организационно-производственных задач при осуществлении инновационных проектов должен обладать магистр, владеющий современными подходами к работе с персоналом, методикой создания инновационных коллективов. Кроме того, в основе подготовки магистра должны лежать знания основных методов организации научных исследований и управления инновационной деятельностью на всех этапах жизненного цикла продукции. Учебная и внеучебная деятельность студентов направлена на приобретение компетенций.

Рейтинг [от англ. rating – оценка] – показатель достижений студентов, определяемый по результатам обучения в семестре. *Итоговый рейтинг* студента учитывает результаты всех видов деятельности студента при освоении образовательной программы.

Система зачётных единиц – система мониторинга, используемая в Европе при реализации образовательного процесса по компетентно-ориентированным образовательным программам (European Credit Transfer System – ECTS). Система зачётных единиц имеет 15-уровневую шкалу.

П2. Задачи изучения дисциплины и компетенции

Дисциплина «Микроволновая и квантовая электроника» (конкретное название дисциплины может быть несколько иным) является одной из важных в подготовке бакалавров по радиотехническим специальностям.

Цель изучения дисциплины – формирование у студентов понимания физических процессов, конструкций электронных и квантовых приборов, инженерных методов их расчёта, а также методов исследования их характеристик. Задачами изучения дисциплины является формирование у студентов следующих компетенций.

Общенаучные компетенции

Готовность и способность использовать фундаментальные законы природы в профессиональной деятельности.

Готовность и способность использовать математику для решения профессиональных задач.

Инструментальные компетенции

Способность самостоятельно работать с компьютером, с литературой и с информационными ресурсами Интернета.

Способность к устной и письменной коммуникации на русском языке и знание одного иностранного языка.

Социально-личностные и общекультурные компетенции

Способность самостоятельно приобретать новые знания, используя современные информационные и образовательные технологии.

Готовность критического осмысления накопленного опыта и способность изменить профиль своей профессиональной деятельности.

Профессиональные компетенции

Способность участвовать в проведении экспериментальных исследований радиотехнических устройств по заданной программе, составлять описания экспериментов, готовить данные для отчётов и другой технической документации.

Способность участвовать в монтаже, наладке и регулировании радиотехнических устройств, а также в испытаниях новых устройств.

Способность выполнять математическое моделирование электронных и квантовых приборов с использованием компьютерных программ.

Способность выполнять сбор, обработку, анализ и систематизацию научно-технической информации по заданной теме.

Способность реализовать оригинальные программы исследований, включая выбор измерительных приборов и способ обработки результатов измерений.

П3. Оценки по разным шкалам

В зачётную книжку и ведомость оценка по дисциплине проставляется в двух формах: в буквенной форме 15-уровневой шкалы ECTS и в традиционной форме (четырёхуровневая шкала или «зачтено»), табл. П3.1.

Таблица ПЗ.1

Соответствие оценок

Характеристика работы	Баллы	ECTS	Традиционная шкала	
Уровень выполнения отвечает всем требованиям, содержание курса освоено, практические навыки сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, их выполнение оценено близким к максимальному числом баллов	90–100	A+	Отлично	Зачтено
		A		
		A–		
Выполнение отвечает большинству требований, содержание курса освоено полностью, необходимые навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения большинства из них оценено числом баллов, близким к максимальному	80–89	B+	Хорошо	
		B		
		B–		
«Хорошо» – уровень выполнения работы отвечает всем основным требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальным числом баллов, некоторые из выполненных заданий, возможно, содержат ошибки	70–79	C+	Удовлетворительно	
		C		
		C–		
Уровень выполнения работы отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено, некоторые виды заданий выполнены с ошибками	60–69	D+	Удовлетворительно	Зачтено
		D		
		D–		

Характеристика работы	Баллы	ECTS	Традиционная шкала	
«Посредственно» – работа слабая, уровень выполнения не отвечает большинству требований, теоретическое содержание курса освоено частично, некоторые практические навыки работы не сформированы, многие предусмотренные программой обучения учебные задания не выполнены либо качество выполнения некоторых из них оценено числом баллов, близким к минимальному	50–59	E		
Неудовлетворительно (с возможностью пересдачи) – теоретическое содержание курса освоено частично, необходимые практические навыки работы не сформированы, большинство учебных заданий не выполнено, либо качество их выполнения оценено числом баллов, близким к минимальному; при дополнительной самостоятельной работе над материалом курса возможно повышение качества выполнения учебных заданий	25–49	FX	Неудовлетворительно	Не зачтено
Неудовлетворительно (без возможности пересдачи) – теоретическое содержание курса не освоено, необходимые практические навыки работы не сформированы, все выполненные учебные задания содержат грубые ошибки, дополнительная самостоятельная работа над материалом курса не приведет к какому-либо значимому повышению качества выполнения учебных заданий	0–24	F		

П4. Оценки по контрольным неделям и аттестация по дисциплине

За 7-ю и 13-ю недели преподаватель выставляет оценки, пользуясь следующими правилами. Если студент не справляется с обучением, баллы не начисляются (0 баллов). Когда материал дисциплины освоен

не в полном объеме, студент получает один балл. И, наконец, при освоении материала в полном объеме работа оценивается в два балла.

Учебным планом по дисциплине предусмотрено выполнение лабораторных работ, курсовой работы и экзамен. За выполнение лабораторных работ студент может набрать наибольшее число баллов – 30, за выполнение курсовой работы 30 баллов. Студент допускается к экзамену только в том случае, если он выполнил и защитил все лабораторные работы, курсовую работу и в течение семестра набрал не менее 40 баллов. При слабой защите лабораторной работы она может быть зачтена без начисления баллов.

Дополнительные баллы (не более 40) начисляются за выступление на семинаре и на конференции.

Если с учетом работ, выполненных свыше предусмотренных основной программой освоения курса, студент набрал более 90 баллов, итоговая оценка по дисциплине может быть выставлена без экзамена. При этом в ведомость и зачетную книжку студента выставляется оценка «отлично», что соответствует группе уровней «А» шкалы ECTS.

Максимальное количество баллов, которое студент может получить на экзамене, равно 40.

Если в семестре студент не набрал 40 баллов, ему выставляется итоговая оценка по дисциплине «неудовлетворительно» (F) без права последующей пересдачи. В этом случае студенту предлагается изучить дисциплину повторно на платной основе.

Если была выставлена итоговая оценка по дисциплине «неудовлетворительно» с правом последующей пересдачи (FX), то в результате такой пересдачи студент имеет право получить оценку не выше E («удовлетворительно»).