

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»
Институт электронных и информационных систем

Кафедра проектирования и технологии радиоаппаратуры



С. И. Эминов
2017 г.

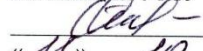
ЭЛЕКТРОНИКА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Учебный модуль по направлению подготовки
11.04.03 – Конструирование и технология электронных средств
Профиль - Микроэлектроника и техника сверхвысоких частот
Рабочая программа

Рабочая программа

СОГЛАСОВАНО

Начальник УМУ

 Г.Н. Чурсинова
« 11 » 10 2017 г.

Разработали

Доцент каф. ПТРА

 С.С. Татаренко

Профессор каф. ПТРА

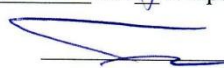
М.И. Бичурин

« ____ » ____ 2017 г.

Принято на заседании кафедры

« 8 » 06 04 2017 г. Протокол № ____

Зав.кафедрой

 М.И.Бичурин

1 Цели и задачи учебного модуля

Целью учебного модуля (УМ) является формирование компетентности студентов в области изучения принципов действия, методов проектирования, освоения теоретических основ функционирования электронных устройств сверхвысоких частот.

Основными задачами УМ являются:

- формирование компетентности студентов в области основных направлений, этапов и перспектив развития квантовой электроники; основных понятий квантовой физики, постулатов квантовой теории;
- формирование компетентности студентов в области принципов действия и базовых конструкций квантовых приборов: квантовых парамагнитных усилителей, оптических квантовых генераторов, газовых оптических квантовых генераторов, твердотельных оптических квантовых генераторов, полупроводниковых квантовых генераторов.
- формирование стратегической компетенции, т.е. способность отбирать и использовать теоретические знания при применении квантовых приборов в науке и технике; решать задачи по расчету параметров квантовых приборов.
- формирование компетентности студентов в области тенденций и перспектив развития микроэлектроники СВЧ, а также смежных областей науки и техники; передового отечественного и зарубежного научного опыта в профессиональной сфере деятельности; в области физических основ работы генераторов СВЧ на диодах Ганна; проектирования диодных автогенераторов СВЧ; усилителей мощности на полевых транзисторах СВЧ; параметрических усилителей; транзисторных усилителей СВЧ; диодных преобразователей частоты; плоскостных излучателей; активных фазированных антенных решёток;
- умение предлагать новые области научных исследований и разработок, новые методологические подходы к решению задач в профессиональной сфере деятельности; использовать современные информационные и компьютерные технологии, средства коммуникаций, способствующие повышению эффективности научной и образовательной сфер деятельности.

2 Место учебного модуля в структуре ОП направления подготовки

Учебный модуль относится к вариативным модулям, читается во 2 семестре.

Для изучения дисциплины необходимы компетенции, сформированные в результате обучения по программе «Электроника и нанoeлектроника».

В структуре УМ в качестве самостоятельных разделов выделены учебные элементы модуля (УЭМ): УЭМ1 «Квантовая электроника» базируется на различных отраслях знаний и научных выводах физики, химии, инженерных дисциплин, связан с технологией электронного производства. УЭМ2 «Микроэлектроника сверхвысоких частот» базируется на знаниях и умениях, полученных при изучении предыдущих курсов физики, химии, инженерных дисциплин, связан с технологией электронного производства.

Знания и умения, полученные при изучении модуля, используются при изучении последующих дисциплин профессионального цикла, а также при подготовке выпускной квалификационной работы.

3 Требования к результатам освоения учебного модуля

Процесс изучения УМ направлен на формирование следующих компетенций:

- ОПК-1: способностью понимать основные проблемы в своей предметной области, выбирать методы и средства их решения;
- ПК-2: способностью выполнять моделирование объектов и процессов с целью анализа и оптимизации их параметров с использованием имеющихся средств исследований, включая стандартные пакеты прикладных программ;

В результате освоения УМ студент должен знать, уметь и владеть:

Код компетенции	Уровень освоения компетенции	Знать	Уметь	Владеть
ОПК-1	базовый	основные проблемы в своей предметной области.	понимать основные проблемы в своей предметной области	методами и средствами решения основных проблем в своей предметной области.
ПК-2	повышенный	цели и задачи научных исследований в своей предметной области.	формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники сверхвысоких частот.	теоретическими и экспериментальными методами и средствами решения сформулированных задач.

4 Структура и содержание учебного модуля

4.1 Трудоемкость учебного модуля

В структуре УМ выделены учебные элементы модуля:

- УЭМ1 Квантовая электроника;
- УЭМ2 Микроэлектроника сверхвысоких частот;

Учебная работа (УР)	Всего	Распределение по семестрам	Коды формируемых компетенций
		2 сем.	
Трудоемкость модуля в зачетных единицах (ЗЕ)	6	6	
Распределение трудоемкости по видам УР в академических часах (АЧ):	216	216	
1) УЭМ1 Квантовая электроника:	109	109	ОПК-1, ПК-2
- лекции	5	5	
- практические занятия	18	18	
- лабораторные работы	-	-	
- в т.ч. аудиторная СРС	5	5	
- внеаудиторная СРС	68	68	
2) УЭМ2 Микроэлектроника сверхвысоких частот:	107	107	ОПК-1, ПК-2
- лекции	4	4	
- практические занятия	18	18	
- лабораторные работы	-	-	
- в т.ч. аудиторная СРС	4	4	
- внеаудиторная СРС	67	67	
Аттестация:			
- экзамен	36	36	

4.2 Содержание и структура разделов учебного модуля

УЭМ1 Квантовая электроника

4.2.1.1 Введение

Значение дисциплины «Квантовая электроника» для студентов направлений подготовки 11.04.04 – «Электроника и наноэлектроника». Содержание и структура курса. Развитие квантовой электроники: основные понятия, этапы и перспективы развития. Гипотеза квантования как решение проблемы теплового излучения: термодинамическое, статистическое рассмотрение и гипотеза квантования.

4.2.1.2 Введение в квантовую физику.

Квантовые постулаты Бора. Гипотеза де-Бройля. Принцип неопределенности. Состояние частицы в квантовой теории: уравнение Шредингера, основные постулаты квантовой теории.

4.2.1.3 Физические основы квантовых приборов.

Излучение и поглощение электромагнитных волн веществом: спонтанное и вынужденное излучение. Условия усиления колебаний в квантовых системах.

4.2.1.4 Квантовые приборы.

Мазеры: молекулярный генератор на пучке молекул аммиака, квантовые парамагнитные усилители (КПУ), КПУ на рубине, Практическое осуществление трехуровневых КПУ. Лазеры: газовые лазеры (гелий-неоновый лазер, лазер на углекислом газе); твердотельные лазеры (лазер на рубине, лазеры на кристаллах и стеклах, активированных неодимом); полупроводниковые лазеры (инжекционный лазер, полосковые гетеролазеры).

4.2.1.5 Заключение

Связь дисциплины «Квантовая электроника» с другими общепрофессиональными и специальными дисциплинами последующей вузовской подготовки. Использование дисциплины для успешного решения задач, связанных с выбором электронных устройств при разработке специального оборудования и умением правильно их эксплуатировать.

УЭМ2 Микроэлектроника сверхвысоких частот

4.2.1.1 Введение

Значение дисциплины «Микроэлектроника сверхвысоких частот» для студентов направлений подготовки 11.04.04 – «Электроника и наноэлектроника». Содержание и структура курса. Развитие микроэлектроники сверхвысоких частот: основные понятия, этапы и перспективы развития.

4.2.2.2 Активные микроэлектронные устройства сверхвысоких частот. 1. Физические основы работы генераторов СВЧ на диодах Ганна. Диод Ганна. Математическая модель диода Ганна. Эквивалентная схема генератора на диоде Ганна. Режимы работы генераторов на диодах Ганна. Оптимальные параметры диода Ганна. 2. Проектирование диодных автогенераторов СВЧ. Квазилинейная теория диодных автогенераторов. Низкочастотные колебания в цепи питания диода. Упрощенная математическая модель генераторного диода. Методика проектирования электрических схем диодных автогенераторов. Пример проектирования цепи СВЧ генератора на диоде Ганна. Конструирование диодных автогенераторов. 3. Усилители мощности на полевых транзисторах СВЧ. Общие сведения. Полевой транзистор СВЧ. Нелинейная эквивалентная схема полевого транзистора с затвором Шотки. Проектирование усилителей мощности на ПТШ. 4. Параметрические усилители. Общая характеристика малошумящих усилителей. Основные характеристики регенеративных

резонансных усилителей. Функциональная схема многоконтурного ППУ. Параметрические диоды. Двухконтурный ППУ. Одноконтурный ППУ. Методы улучшения характеристик ППУ. Пример расчёта двухконтурного ППУ. Конструкции ППУ. 5. Транзисторные усилители СВЧ. Общие сведения о транзисторах и транзисторных усилителях СВЧ. Бесструктурные модели транзистора СВЧ. Устойчивость транзисторных усилителей СВЧ. Примеры расчёта узкополосных усилителей. Особенности построения транзисторных усилителей СВЧ. Практические схемы транзисторных усилителей.

4.2.2.3 Антенны сверхвысоких частот. 1. Антенны СВЧ в интегральном исполнении. Общие сведения. Основные типы излучателей. Плоскостные излучатели. 2. Антенны СВЧ в интегральном исполнении. Расчёт основных характеристик антенн. Печатные антенные решётки. 3. Активные фазированные антенные решётки. Общие сведения. Общие методы оценки энергетических параметров АФАР. 4. Активные фазированные антенные решётки. Оптимизация массогабаритных характеристик АФАР. Стоимостные характеристики АФАР.

4.2.2.4 Заключение

Связь дисциплины «Микроэлектроника сверхвысоких частот» с другими общепрофессиональными и специальными дисциплинами последующей вузовской подготовки. Использование дисциплины для успешного решения задач, связанных с выбором электронных устройств при разработке специального оборудования и умением правильно их эксплуатировать.

4.3 Организация изучения учебного модуля

Методические рекомендации по организации изучения УМ с учетом использования в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения учебных занятий даются в Приложении А.

5 Контроль и оценка качества освоения учебного модуля

Контроль качества освоения студентами УМ и его составляющих осуществляется непрерывно в течение всего периода обучения с использованием балльно-рейтинговой системы (БРС), являющейся обязательной к использованию всеми структурными подразделениями университета.

Для оценки качества освоения модуля используются формы контроля: текущий – регулярно в течение всего семестра, семестровый (в виде экзамена) – по окончании изучения УМ.

На экзамен выносятся вопросы и задания по всем учебным элементам. Максимальное количество баллов, получаемое на экзамене, – 50. Максимальное количество баллов по модулю – 300.

Содержание видов контроля и их график отражены в технологической карте учебного модуля (Приложение Б). Оценка качества освоения модуля осуществляется с использованием фонда оценочных средств, разработанного для данного модуля, по всем формам контроля в соответствии с положением «О фонде оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации студентов и итоговой аттестации выпускников». В качестве оценочных средств на протяжении семестра используются: практические задания, экзамен.

6 Учебно-методическое и информационное обеспечение

Учебно-методическое и информационное обеспечение учебного модуля представлено Картой учебно-методического обеспечения (Приложение Г).

7 Материально-техническое обеспечение учебного модуля

Для осуществления образовательного процесса по модулю используется лекционная аудитория, оборудованная мультимедийными средствами, а также компьютерный класс с установленным ПО.

Приложения (обязательные):

А – Методические рекомендации по организации изучения учебного модуля

Б – Технологическая карта

В – Паспорта компетенций

Г – Карта учебно-методического обеспечения УМ

Приложение А
(обязательное)

**Методические рекомендации по организации изучения учебного модуля
«Электроника сверхвысоких частот»**

Учебный модуль «Электроника сверхвысоких частот» разделен на два учебных элемента модуля (УЭМ): «Квантовая электроника», «Микроэлектроника сверхвысоких частот». В рамках модуля предусмотрены лекционные и практические занятия.

В таблице А.1 отражены разделы модуля, технологии и формы проведения занятий, задания по самостоятельной работе студента и ссылки на необходимую литературу. Содержание разделов представлено в п. 4.2 рабочей программы модуля.

А.1 Методические рекомендации по теоретической части учебного модуля

Теоретическая часть модуля направлена на формирование системы знаний о электронике сверхвысоких частот. Основное содержание теоретической части излагается преподавателем на лекционных занятиях, а также усваивается студентом при знакомстве с дополнительной литературой, которая предназначена для более глубокого овладения знаниями основных дидактических единиц соответствующего раздела и указана в таблице А.1.

Экзамен по УМ делится на теоретическую и практическую части. Теоретическая часть проводится в форме устных ответов на вопросы экзаменационного билета. На практической части студенты выполняют практические задания по УЭМ1, УЭМ2.

Пример экзаменационного билета.

1 Вопрос по УЭМ1

2 Вопрос по УЭМ2

4 Практическое задание по УЭМ1 (варианты заданий хранятся на кафедре ПТРА)

5 Практическое задание по УЭМ2 (варианты заданий хранятся на кафедре ПТРА)

Таблица А.1 - Организация изучения учебного модуля «Электроника сверхвысоких частот»

Раздел модуля	Технология и форма проведения занятий	Задания на СРС	Литература и интернет-ресурсы
УЭМ1 Квантовая электроника			
1.1 Введение. Основные понятия, этапы и перспективы развития квантовой электроники.	– вводная лекция – практические занятия	Аудиторные занятия – знакомство с теоретическим материалом; выполнение практических заданий Внеауд. СРС – самостоятельное изучение литературы по теме	Основная литература: 1. Малышев В.А. Основы квантовой электроники и лазерной техники: Учеб. пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 2005. – 542 с. 2. Квантовая физика. Основные законы. / И.Е. Иродов. - 3-е изд., стер. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. - 256с. 3. Шишкин Г.Г. Приборы квантовой электроники: Учеб. пособие для вузов. - М.: САЙНС-ПРЕСС, 2004. - 80с. 4. Базовые лекции по электронике (в 2-х т.) Т. 1: Электрорадиотехника, плазменная и квантовая электроника / сб. под ред. В. М. Пролейко. - М.: Техносфера, 2009. – 479 с.: ил. 5. Оптическая и квантовая электроника: Учеб. для вузов/ А.Н. Пихтин. – М.: Высш. шк., 2001. – 573 с.: ил. Дополнительная литература: 1. Карлов Н. В. Лекции по квантовой электронике: Учеб. пособие для вузов. - М.: Наука, 1984. – 322 с. 2. Светцов, В.И. Оптическая и квантовая электроника: учеб. пособие / В. И. Светцов; Иван. гос. хим.-техн. ун-т; - 2-е изд., исправл. и доп. - Иваново, 2010. 196 с. ISBN 978-5-9616-0386-6
1.2 Введение в квантовую физику.	– лекция – практические занятия	Аудиторные занятия – знакомство с теоретическим материалом; выполнение практических заданий Внеауд. СРС – самостоятельное изучение литературы по теме	
1.3 Физические основы квантовых приборов.	– лекция – практические занятия	Аудиторные занятия – знакомство с теоретическим материалом; выполнение практических заданий Внеауд. СРС – самостоятельное изучение литературы по теме	

Раздел модуля	Технология и форма проведения занятий	Задания на СРС	Литература и интернет-ресурсы
1.4 Квантовые приборы. Заключение	– лекция – практические занятия	Аудиторные занятия – знакомство с теоретическим материалом; выполнение практических заданий Внеауд. СРС – самостоятельное изучение литературы по теме	
УЭМ2 Микроэлектроника сверхвысоких частот			
2.1 Введение. Развитие микроэлектроники сверхвысоких частот: основные понятия, этапы и перспективы развития.	– вводная лекция – практические занятия	Аудиторные занятия – знакомство с теоретическим материалом; выполнение практических заданий Внеауд. СРС – самостоятельное изучение литературы по теме	Основная литература: 1. Ефимов И. Е. Основы микроэлектроники: учебник / И. Е. Ефимов, И. Я. Козырь. - 3-е изд., стер. - СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2008. - 383, [1] с.: ил. - (Учебники для вузов, Специальная литература). 2. Нефедов Е. И. Устройства СВЧ и антенны : учеб. пособие для вузов / Е. И. Нефёдов. - М. : Академия, 2009. - 375, [2] с. : ил. - (Высшее профессиональное образование, Радиоэлектроника). - Библиогр.: с. 363-367.
2.2 Активные микроэлектронные устройства сверхвысоких частот.	– лекция – практические занятия	Аудиторные занятия – знакомство с теоретическим материалом; выполнение практических заданий Внеауд. СРС – самостоятельное изучение литературы по теме	Дополнительная литература: 1. Щука А.А. Электроника: Учеб.пособие / Под ред.А.С.Сигова. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. - 799с.: ил. - (Учебное пособие). 2. Барыбин А.А. Физико-технологические основы электроники: Учеб.пособие для вузов / Под ред.А.А.Барыбина. - СПб.: Лань, 2001. - 268с. 3. Микроэлектроника сверхвысоких частот. Дисциплина по направлению 01.04.04. Магистерская программа «Электроника и

Раздел модуля	Технология и форма проведения занятий	Задания на СРС	Литература и интернет-ресурсы
2.3 Антенны сверхвысоких частот.	– лекция – практические занятия	Аудиторные занятия – знакомство с теоретическим материалом; выполнение практических заданий Внеауд. СРС – самостоятельное изучение литературы по теме	наноэлектроника»: Рабочая программа / Сост. Татаренко А.С.; НовГУ.- Новгород, 2014. -11 с.
2.4 Заключение.	– лекция – практические занятия	Аудиторные занятия – знакомство с теоретическим материалом; выполнение практических заданий Внеауд. СРС – самостоятельное изучение литературы по теме	

А.2 Методические рекомендации по практическим занятиям

Цель практических занятий - формирование компетентности студентов в области организации научно-исследовательских разработок, способствующей становлению их готовности к решению задач профессиональной деятельности.

Задачи занятий - углубление знаний, полученных из теоретической части и применение их в условиях, приближенных к условиям реальной профессиональной деятельности.

Методы и средства проведения практических занятий

Проведение практических занятий строится следующим образом:

- 50% аудиторного времени отводится на усвоение теоретического материала;
- 40% аудиторного времени – самостоятельная работа студентов;
- 10% аудиторного времени – разбор типовых ошибок (в конце текущего занятия).

На каждом практическом занятии по результатам самостоятельной работы проставляются баллы.

А.3 Методические рекомендации по самостоятельной работе студентов

Аудиторная и внеаудиторная самостоятельная работа студентов включает в себя выполнение домашних работ, подготовка и представление докладов, выполнение практических заданий, участие в опросах и подготовка к экзамену.

Примеры практических заданий к УЭМ1:

1 Определить уровни энергии и нормированные волновые функции частицы, находящейся в «потенциальном ящике». Потенциальная энергия частицы $V=\infty$ при $x<0$ и при $x>a$, $V=0$ при $0<x<a$.

2 Показать, что для частицы, находящейся в «потенциальном ящике» (см. предыдущую задачу), имеют место соотношения:

$$\bar{x} = \frac{1}{2}a, \quad \overline{(x - \bar{x})^2} = \frac{a^2}{12} \left(1 - \frac{6}{n^2 \pi^2} \right).$$

Доказать, что для больших значений n последний результат совпадает с соответствующим классическим.

3 Определить распределение вероятностей различных значений импульса для частицы в «потенциальном ящике», находящейся в n -м энергетическом состоянии.

4 Определить уровни энергии и волновые функции частицы, находящейся в несимметрической потенциальной яме (см. рис. 1). Рассмотреть случай $V_1 = V_2$.

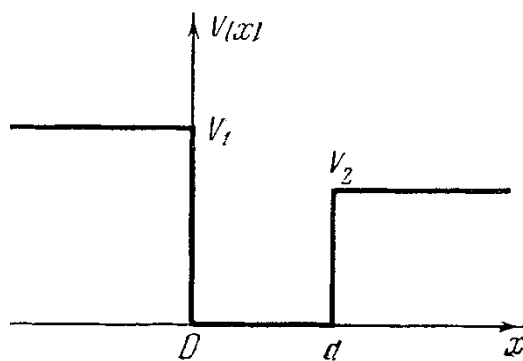


Рисунок 1

5 Ненасыщенный коэффициент усиления с учётом поперечного сечения лазерного перехода s_n : $\beta = [N_2 - (g_2/g_1)N_1] s_n$, где $s_n = g(\omega)\lambda^2/(8\pi n^2 T_1)$, $T_1 = 1/A_{mn}$ – время жизни электрона на верхнем лазерном уровне.

Для центральной части лазерного перехода $s_n(\omega_0) = [2\pi n^2 \lambda^{-2} T_1 \Delta\omega_{mn}]^{-1}$.

Сравните значения s_n для ионов хрома в рубине, ионов неодима в стекле и атомов неона в газовой среде. Для рубина $\lambda = 0,69$ мкм; $n = 1,76$; $T_1 \approx 4 \cdot 10^{-3}$ с; $\Delta\omega_{mn} \approx 22 \cdot 10^{11}$ рад/с; для стекла $\lambda = 1,06$ мкм; $n = 1,52$; $T_1 \approx 0,4 \cdot 10^{-3}$ с; $\Delta\omega_{mn} \approx 6 \cdot 10^{13}$ рад/с; для газа $\lambda = 0,63$ мкм; $n = 1,0$; $T_1 \approx 1,6 \cdot 10^{-6}$ с; $\Delta\omega_{mn} \approx 9,4 \cdot 10^9$ рад/с.

6 Рассчитайте коэффициенты усиления на единицу длины следующих агрессивных сред: рубин с 0,05%-ной концентрации ионов хрома, $N_0 \approx 1,6 \cdot 10^{19}$ см⁻³; стекло с 2%-ной концентрацией окисла неодима, $N_0 \approx 2,0 \cdot 10^{20}$ см⁻³; газ неон при давлении 1 мм рт. ст. для комнатной температуры, $N_0 \approx 3,2 \cdot 10^{16}$ см⁻³. При расчётах считайте уровень накачки соответствующим инверсии населённостей, составляющей $0,1N_0$ для рубина и стекла и $0,0001$ для газа. Остальные данные возьмите в задаче 2.1. Оцените максимальный коэффициент усиления среды.

7 Воспользуйтесь данными задачи 2.1 для вычисления параметра насыщения a в различных активных средах, представив выражение для параметра насыщения в виде $a = \lambda^2 T_2 / (2\pi^2 n^2 \hbar \omega)$, где $T_2 = 2\pi / (\Delta\omega_{mn})$

8 Рассчитайте мощность излучения двухуровневого парамагнитного лазера на рубине при $\omega = 3 \cdot 10^{10}$ Гц; $Q_{рез} = 2,5 \cdot 10^3$; $V = 3 \cdot 10^{-2}$ см³; $N_0 = 5 \cdot 10^{17}$ см⁻³; $T_1 = 6 \cdot 10^{-2}$ с; $T_2 = 6 \cdot 10^{-9}$ с.

9 Рассчитайте мощность излучения пучковых лазеров на NH_3 и H_2 , используя данные табл. А1.

Таблица А1

Мазерная среда	ω , Гц	$Q_{рез}$	V , см ³	N_0 , см ⁻³	$T_1 = T_2$, с
NH_3	$2,3 \cdot 10^{10}$	10^4	10	10^9	10^{-4}
H_2	$1,4 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^4$	10	10^9	1

По приведённым ниже формулам оцените смещение частоты генерации при расстройке частот резонансного контура и центральной частоты перехода. Вычислите относительную нестабильность частоты.

$$\text{Частота генерации } \omega = \omega_0 + \frac{\omega_p - \omega_0}{1 + K} = \omega_p + \frac{\omega_0 - \omega_p}{1 + K} K,$$

$$\text{где величина } K = \frac{\pi c}{2L\Delta\omega_L} \ln \frac{1}{\rho_1 \rho_2}; \text{ резонансная частота } \omega_p = \frac{2\pi q - \varphi_1 - \varphi_2}{2n_0 L} \text{ с.}$$

10 Сравните выходную мощность газовых лазеров в непрерывном режиме по формулам §7.3 [2], считая, что все параметры резонаторов одинаковы, а значения параметров λ , $1/a$ и β_0 даны в табл 2А.

Таблица 2А

Газ	λ , мкм	$1/a$, Вт/см ²	β_0 , см ⁻¹
$He-Ne$	0,63	2,5	$5 \cdot 10^{-4}$
	1,15	0,15	$5 \cdot 10^{-4}$
	3,39	0,002	$4 \cdot 10^{-2}$
Ar^+	0,48	50	$5 \cdot 10^{-3}$
CO_2	10,6	60	$2 \cdot 10^{-2}$

11 Сравните пороговые мощности накачки твёрдотельных лазеров, считая, что к.п.д. преобразования электрической энергии, подведённой к лампе накачки, в поглощённую энергию в полосе поглощения равен 0,01. Используйте решение задачи и данные табл 3А. Рассчитайте и

сравните выходную мощность этих лазеров по формулам §7.3 [2], принимая параметры резонаторов и размеры активных сред одинаковыми.

Таблица 3А

Активная среда	λ , мкм	$\lambda_{\text{нак}}$, мкм	N_0 , см ⁻³	$s_{\text{п}}$, см ²	T_1 , с	β_0 , см ⁻¹	T_2 , с
Рубин (Cr^{3+})	0,69	0,4	$2 \cdot 10^{19}$	$1,2 \cdot 10^{-20}$	$4 \cdot 10^{-3}$	0,4	$3 \cdot 10^{-12}$
Стекло (Nd^{3+})	1,06	0,8	$2 \cdot 10^{20}$	$1,8 \cdot 10^{-20}$	$4 \cdot 10^{-4}$	0,6	10^{-13}
ИАГ (Nd^{3+})	1,06	0,8	$2 \cdot 10^{20}$	$9 \cdot 10^{-19}$	$4 \cdot 10^{-4}$	30	$5 \cdot 10^{-12}$

12 Чему равна *сила света* и *сила излучения* CO_2 – лазера мощностью 1 кВт и расходимостью 2 миллирадиана?

13 Ненасыщенный логарифмический коэффициент усиления лазера на парах меди $\tilde{K}_0 = 40$ децибел. Найти условие для коэффициента обратной связи β , при котором возможна генерация.

14 Под каким углом к оптической оси одноосного кристалла нужно направить луч света, чтобы его состояния поляризации не изменилось?

15 Ненасыщенный показатель преломления рубинового лазера $k_0 = 0,1 \text{ см}^{-1}$, а длина активной среды $l = 10$ см. Найти условие для коэффициента обратной связи β , при котором возможна генерация.

16 Во сколько раз можно увеличить освещенность поверхности, на которую падает лазерное излучение мощностью 1 милливатт и расходимостью 1 миллирадиан с помощью линзы с фокусным расстоянием 10 см?

17 Если перетяжка располагается в передней фокальной плоскости собирающей линзы, то на каком расстоянии от линзы располагается перетяжка преобразованного лазерного пучка?

18 Каким должен быть угол расходимости излучения лазера мощностью 1 милливатт, чтобы *сила излучения* равнялась 10^4 Вт/стерад. Изменяется ли *сила излучения* для лазерного пучка в дальней зоне?

19 На каком расстоянии от перетяжки кривизна волновой поверхности гауссова пучка становится максимальной? Во сколько раз при этом возрастает поперечный радиус пучка?

20 Определите размерность интегрального коэффициента Эйнштейна для спонтанного излучения.

21 Сравните освещенность от точечного источника (лампы) мощностью 100 Вт на расстоянии 10 м и от гелий-неонового лазера мощностью 1 милливатт на расстоянии 1000 м (радиус пучка – 0.5 мм в перетяжке).

22 Полуширина доплеровского контура усиления равна 1600 МГц. Оцените число продольных мод, генерируемых лазером с длиной резонатора 0.5 м. Каким образом можно обеспечить одночастотный режим генерации?

23 Оценить величину *силы излучения* в дальней зоне для гелий-неонового лазера.

24 Оцените минимальную длину когерентности излучения гелий-неонового лазера, если его потери равны 0.1 %.

25 Чему равен коэффициент обратной связи при возникновении генерации в лазере?

26 Чему равна длина волны излучения *второй гармонике* излучения рубинового лазера?

Вопросы к экзамену УЭМ1 «Квантовая электроника»

1. Определение и объект исследования квантовой электроники. Этапы и перспективы развития квантовой электроники.
2. Причины возникновения гипотезы квантования. Формула Планка.
3. Квантовые постулаты Бора. Гипотеза Де-Бройля. Волновая функция.
4. Принцип неопределенности Гейзенберга. Принцип суперпозиции пси-функций.
5. Уравнение Шредингера. Уравнение Шредингера для стационарных состояний.
6. Операторы физических величин. Собственные состояния.
7. Основные постулаты квантовой теории.
8. Излучение и поглощение электромагнитных волн веществом. Спонтанное и вынужденное излучение.
9. Условия усиления колебаний в квантовых системах.
10. Молекулярный генератор на пучке молекул аммиака.
11. Принцип работы квантовых парамагнитных усилителей (КПУ). Электронный парамагнитный резонанс.
12. Релаксационные процессы в парамагнитных кристаллах.
13. Принцип действия трехуровневых парамагнитных усилителей.
14. КПУ на рубине. Расщепление энергетических уровней иона хрома в рубине. Пушпульный режим накачки
15. Практическое осуществление трехуровневых КПУ: резонаторные КПУ, КПУ бегущей волны.
16. Лазер. История создания. Особенности оптического диапазона. Достоинства лазерного излучения.
17. Общая схема лазера. Создание инверсии. Открытый резонатор.
18. Газовые лазеры. Общая схема работы газового лазера.
19. Устройство и принцип действия гелий-неонового лазера.
20. Устройство и принцип действия лазера на углекислом газе.
21. Твердотельные лазеры. Принцип действия лазера на рубине.
22. Твердотельные лазеры на кристаллах и стеклах, активированных неодимом.
23. Полупроводниковые лазеры. Условие для создания инверсии населенности. Принцип действия инжекционного лазера.
24. Конструкции инжекционных лазеров: инжекционный лазер на основе вырожденного GaAs, полосковый гетеролазер.

Примеры практических заданий к УЭМ2:

1. МДП-структура имеет подложку из кремния р-типа с концентрацией примеси $N_a = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и толщиной оксидного слоя 112 нм. Максимальная удельная емкость в режиме малого сигнала на высоких частотах составляет 30 нФ/см^2 при напряжении $V_3 = 3 \text{ В}$ (напряжение, совпадающее с V_{nz}) и потенциале $\phi_s = 0,52 \text{ В}$, постоянном в режиме инверсии. Вычислите: а) пороговое напряжение и соответствующую емкость C_{min} , если максимально достижимая толщина обедненной области $W = 1,17 \text{ мкм}$; б) плотность зарядов Q_{ss} только в оксидном слое; в) плотности заряда в обедненной области, инверсном слое, оксидном слое и металле при $V_3 = 0$. Известно, что $\phi_{МП} = -0,3 \text{ эВ}$.

Ответ: а) $V_{пор} = -2,17 \text{ В}$, $C_{min} = 8,9 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/см}^2$; б) $Q_{ss} = 8,1 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$; в) $-9,36 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$; $-6,5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$; $-5,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$; $-6,6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$ и 2 с

2. МДП-конденсаторы имеют подложки с концентрациями примеси $N_a = 10^{14}$; 10^{15} и 10^{16} см^{-3} . Вычислите для каждого из трех указанных значений концентрации: а) максимальную толщину области пространственного заряда; б) пороговые напряжения, полагая, что $\phi_{МП} = -1,0 \text{ В}$; $C_{min} = 3,35 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$; $d = 100 \text{ нм}$; $Q_{ss} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$.
 Ответ: а) $W_m = 19$; 2; 0,289 нм; б) $V_{пор} = -60$; $-248,1$; -942 мВ .

3. Подсчитайте максимальную поверхностную плотность подвижного заряда дырок Q_p , которая может наблюдаться в МДП-конденсаторе с алюминиевым затвором, если к затвору приложен импульс напряжения с амплитудой -10 В и напряжение на границе раздела становится по меньшей мере равным 2 В . Подложка из кремния n-типа с концентрацией примеси $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, толщина оксидного слоя 100 нм . Известно, что $Q_{ss} = 8 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$; $\phi_{МП} = -0,3 \text{ эВ}$.
 Ответ: $Q_p = 2,32 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/см}^2$.

4. МДП-структура создана на кремниевой подложке p-типа. Концентрация акцепторной примеси $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщина оксидного слоя d составляет 120 нм , затвор выполнен из алюминия. Вычислите пороговое напряжение, если известно, что поверхностная плотность заряда составляет $4,8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$.
 Ответ: $V_{пор} = -1,46 \text{ В}$.

5. В некотором идеальном p – n-переходе обратный ток насыщения $I_0 = 10^{-14} \text{ А}$ при $T = 300 \text{ К}$ и $I_0 = 10^{-9} \text{ А}$ при $T = 125^\circ\text{С}$. Определить напряжения на p – n-переходе в обоих случаях, если прямой ток равен 1 мА .
 Ответ: $0,66$ и $0,5 \text{ В}$.

6. Резкий германиевый p – n-переход имеет площадь поперечного сечения $S = 1 \text{ мм}^2$. Область p сильно легирована, так что ее удельная проводимость в несколько раз больше удельной проводимости n-области. Удельное сопротивление n-области равно $5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, а время жизни носителей заряда $\tau_p = 50 \text{ мкс}$. Определить: а) обратный ток насыщения I_0 ; б) прямое напряжение, при котором ток равен 1 мА .
 Ответ: а) $3,1 \text{ мкА}$; б) $0,15 \text{ В}$.

7. Обратный ток насыщения полупроводникового диода $I_0 = 1 \text{ мкА}$ при $T = 300 \text{ К}$. Определить сопротивление диода постоянному току при прямом напряжении, равном 150 мВ .
 Ответ: 450 Ом .

8. Определить концентрацию дырок и электронов в германии p-типа при $T = 300 \text{ К}$, если его удельная проводимость $\sigma = 100 \text{ См/см}$.
 Ответ: $p_p = 3,29 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; $n_p = 1,9 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Контрольные вопросы к УЭМ2:

1. Диод Ганна. Математическая модель диода Ганна.
2. Эквивалентная схема генератора на диоде Ганна.
3. Режимы работы генераторов на диодах Ганна. Оптимальные параметры диода Ганна.
4. Квазилинейная теория диодных автогенераторов.
5. Низкочастотные колебания в цепи питания диода.
6. Упрощённая математическая модель генераторного диода.
7. Методика проектирования электрических схем диодных автогенераторов.

8. Пример проектирования цепи СВЧ генератора на диоде Ганна. Конструирование диодных автогенераторов.
9. Полевой транзистор СВЧ. Нелинейная эквивалентная схема полевого транзистора с затвором Шотки.
10. Проектирование усилителей мощности на ПТШ.
11. Общая характеристика малошумящих усилителей.
12. Основные характеристики регенеративных резонансных усилителей.
13. Функциональная схема многоконтурного ППУ.
14. Параметрические диоды. Двухконтурный ППУ. Одноконтурный ППУ.
15. Методы улучшения характеристик ППУ.
16. Пример расчёта двухконтурного ППУ. Конструкции ППУ.
17. Общие сведения о транзисторах и транзисторных усилителях СВЧ.
18. Бесструктурные модели транзистора СВЧ.
19. Устойчивость транзисторных усилителей СВЧ.
20. Примеры расчёта узкополосных усилителей.
21. Особенности построения транзисторных усилителей СВЧ. Практические схемы транзисторных усилителей.
22. Антенны СВЧ в интегральном исполнении, общие сведения.
23. Основные типы излучателей. Плоскостные излучатели.
24. Расчёт основных характеристик антенн.
25. Печатные антенные решётки.
26. Активные фазированные антенные решётки, общие сведения.
27. Общие методы оценки энергетических параметров АФАР.
28. Оптимизация массогабаритных характеристик АФАР. Стоимостные характеристики АФАР.

Примеры экзаменационных билетов**Экзаменационный билет № 1**

по модулю *Электроника сверхвысоких частот*
кафедра *Проектирование и технология радиоаппаратуры*
институт *Электронных и информационных систем*

1. Определение и объект исследования квантовой электроники. Этапы и перспективы развития квантовой электроники.
2. Устойчивость транзисторных усилителей СВЧ..
3. Задача

Утверждаю: зав.кафедрой ПТРА _____ М. И. Бичурин
“ _____ ” _____ 201__ г.

Экзаменационный билет № 2

по модулю *Электроника сверхвысоких частот*
кафедра *Проектирование и технология радиоаппаратуры*
институт *Электронных и информационных систем*

1. Причины возникновения гипотезы квантования. Формула Планка.
2. Антенны СВЧ в интегральном исполнении, общие сведения.
3. Задача

Утверждаю: зав.кафедрой ПТРА _____ М. И. Бичурин
“ _____ ” _____ 201__ г.

Приложение Б
(обязательное)

Технологическая карта
учебного модуля «Электроника сверхвысоких частот»
семестр – 2, ЗЕ – 6, вид аттестации – экзамен, акад. часов – 216, баллов рейтинга – 300

№ и наименование раздела учебного модуля, КП/КР	№ нед. сем.	Трудоемкость, ак.час					Форма текущего контроля успеваемости (в соответствии с паспортом ФОС)	Максим. кол-во баллов рейтинга
		Аудиторные занятия				СРС		
		ЛЕК	ПЗ	ЛР	АСРС			
УЭМ1 Квантовая электроника	1-18 (семестр 2)	5	18		5	68		125
1 Введение Основные понятия, этапы и перспективы развития квантовой электроники.	1-2	1	2		1	8	выполнение заданий	20
2 Введение в квантовую физику.	3-7	1	5		1	16	выполнение заданий	35
3 Физические основы квантовых приборов.	8-12	1	5		1	16	выполнение заданий	35
4 Квантовые приборы. Заключение.	13-18	2	6		2	28	выполнение заданий	35

№ и наименование раздела учебного модуля, КП/КР	№ нед. сем.	Трудоемкость, ак.час					Форма текущего контроля успеваемости (в соответствии с паспортом ФОС)	Максим. кол-во баллов рейтинга
		Аудиторные занятия				СРС		
		ЛЕК	ПЗ	ЛР	АСРС			
УЭМ2 Микроэлектроника сверхвысоких частот	1-18 (семестр 2	4	18		4	67		125
1 Введение. Развитие микроэлектроники сверхвысоких частот: основные понятия, этапы и перспективы развития.	1-2	1	2		1	8	выполнение заданий	25
2. Активные микроэлектронные устройства сверхвысоких частот.	3-7	1	5		1	16	выполнение заданий	30
3. Антенны сверхвысоких частот.	8-12	1	5		1	16	выполнение заданий	35
4. Заключение.	13-18	1	6		1	27	выполнение заданий	35
Семестровый контроль	сессия					36	экзамен	50
Итого:		9	36		9	171		300

Критерии оценки качества освоения студентами дисциплины

6 ЗЕ = 50 б. × 6 = 300 баллов:

- оценка «удовлетворительно» – от 150 до 209 баллов;
- оценка «хорошо» – от 210 до 269 баллов;
- оценка «отлично» – от 270 до 300 баллов

Приложение В
(обязательное)

**Паспорта компетенций
дисциплины «Электроника сверхвысоких частот»**

ОПК-1: способность понимать основные проблемы в своей предметной области, выбирать методы и средства их решения

Показатели	Оценочная шкала		
	удовлетворительно	хорошо	отлично
Знает основные проблемы электроники сверхвысоких частот	Испытывает трудности при формулировании проблем электроники сверхвысоких частот	Допускает неточности при формулировании проблем электроники сверхвысоких частот	Твердо знает проблемы электроники сверхвысоких частот
Владеет методами и средствами решения проблем электроники сверхвысоких частот	Испытывает трудности в применении методов и средств решения проблем электроники сверхвысоких частот	Допускает неточности в применении методов и средств решения проблем электроники сверхвысоких частот	Точен в применении методов и средств решения проблем электроники сверхвысоких частот

ПК-2: способностью выполнять моделирование объектов и процессов с целью анализа и оптимизации их параметров с использованием имеющихся средств исследований, включая стандартные пакеты прикладных программ

Показатели	Оценочная шкала		
	удовлетворительно	хорошо	отлично
Знает основные цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники, способен обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач	Испытывает трудности при формировании целей и постановке задач научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники	Допускает неточности при формировании целей и постановке задач научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники	Твердо знает способы формирования целей и постановки задач научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники

Показатели	Оценочная шкала		
	удовлетворительно	хорошо	отлично
Знает основные цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, способен обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач	Испытывает трудности при формировании целей и постановке задач научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники	Допускает неточности при формировании целей и постановке задач научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники	Твердо знает способы формирования целей и постановки задач научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники
Владеет способностью формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, способен обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач	Испытывает трудности при формировании целей и постановке задач научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники	Допускает неточности при формировании целей и постановке задач научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники	Точен в применении методов и способов формирования целей и постановки задач научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники

Приложение Г
(обязательное)

Карта учебно-методического обеспечения

Учебного модуля «**Электроника сверхвысоких частот**»

Направление: Конструирование и технология электронных средств

Профиль - Микроэлектроника и техника сверхвысоких частот

Формы обучения очная

Курс 1 Семестр 2

Часов: всего 216, лекций 9, практ. зан. 36, , СРС 171

Обеспечивающая кафедра: ПТРА

Таблица В.1- Обеспечение учебного модуля учебными изданиями

Библиографическое описание издания (автор, наименование, вид, место и год издания, кол. стр.)	Кол. экз. в библ. НовГУ	Наличие в ЭБС
Учебники и учебные пособия		
1. Малышев В.А. Основы квантовой электроники и лазерной техники: Учеб. пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 2005. – 542 с.	5	
2. Квантовая физика. Основные законы. / И.Е. Иродов. - 3-е изд., стер. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. - 256с.	2	
3. Базовые лекции по электронике (в 2-х т.) Т. 1: Электровакuumная, плазменная и квантовая электроника / сб. под ред. В. М. Пролейко. - М.: Техносфера, 2009. – 479 с.: ил.	2	
4. Квантовая и оптическая электроника : учеб. для вузов: Учеб. для вузов/ А.Н. Пихтин. – М. : Высшая школа : Абрис, 2012. - 655, [1] с. : ил. - Библиогр.: с. 652-653.	10	
5. Ефимов И. Е. Основы микроэлектроники: учебник / И. Е. Ефимов, И. Я. Козырь. - 3-е изд., стер. - СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2008. - 383, [1] с.: ил. - (Учебники для вузов, Специальная литература).	26	
6. Нефедов Е. И. Устройства СВЧ и антенны : учеб. пособие для вузов / Е. И. Нефёдов. - М. : Академия, 2009. - 375, [2] с. : ил. - (Высшее профессиональное образование, Радиоэлектроника). - Библиогр.: с. 363-367.	16	
7. Шука А.А. Электроника: Учеб. пособие / Под ред. А.С. Сигова. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. - 799с.: ил. - (Учебное пособие).	25	
Учебно-методические издания		
1. Электроника сверхвысоких частот. Дисциплина по направлению 11.04.03. Магистерская программа «Микроэлектроника и техника сверхвысоких частот»: Рабочая программа / Сост. Татаренко А.С.; НовГУ.- Новгород, 2017. - 24 с.	-	

Таблица 2 – Информационное обеспечение модуля

Название программного продукта, интернет-ресурса	Электронный адрес	Примечание

Таблица 3 – Дополнительная литература

Библиографическое описание* издания (автор, наименование, вид, место и год издания, кол. стр.)	Кол. экз. в библ. НовГУ	Наличие в ЭБС
1 Рекус Г.Г. Сборник задач и упражнений по электротехнике и основам электроники: учеб. пособие для студ. вузов. - 2-е изд., перераб. - М.: Высшая школа, 2001. - 415с.: ил.	18	
2 Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: учеб. пособие для вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Дрофа, 2005. - 415с.: ил.	23	
3 Приборы физической электроники: учеб. пособие для вузов / Под ред. А.И. Астайкина. - М.: Высшая школа, 2008. - 227с.: ил.	14	
4		
5		

Действительно для учебного года _____ / _____

Зав. кафедрой _____ / М.И. Бичурин /
подпись И.О.Фамилия

_____ 201.. г.

СОГЛАСОВАНО

НБ НовГУ:

_____ должность _____ подпись _____ расшифровка