

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет
Кафедра физики полупроводников, электроники и наноэлектроники

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол № 6 от «31» мая 2023 г.

Рабочая программа дисциплины (модуля)

СВЧ-электроника

Уровень высшего образования
бакалавриат

Направление подготовки: 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная
техника

Направленность (профиль): материалы микро- и наносистемной техники

Форма обучения: очная

Нижегород, 2023 год

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «СВЧ-электроника» относится к дисциплинам по выбору формируемой участниками образовательных отношений части основной образовательной программы по направлению 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника». Данная дисциплина преподается в шестом семестре. Для усвоения курса необходимы знания, полученные при изучении таких дисциплин, как «Физика» (общий курс), «Математическая физика», «Теоретические основы электро- и радиотехники», «Схемотехника», «Электродинамика». Всестороннее овладение данной дисциплиной является важным условием для полноценной профессиональной подготовки по направлению 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника».

Курс «СВЧ-электроника» опирается на следующие дисциплины:

- математический анализ, дифференциальные уравнения, методы математической физики, теория функций комплексной переменной;
- электродинамика;
- физика твердого тела;
- физика: электричество, колебания и волны;
- теоретические основы электро- и радиотехники;

Дисциплина «СВЧ-электроника» направлена на формирование у студентов систематизированных знаний в области распространения радиоволн, передачи радиосигналов, ознакомление студентов с элементной базой электротехники и радиоэлектроники, методами расчета электрических цепей и электронных схем, принципами построения радиотехнических устройств, принципами модуляции и детектирования модулированных сигналов.

Целями освоения дисциплины «СВЧ-электроника» являются:

- формирование базовых знаний в области СВЧ электроники, понимание практической значимости и особенностей передачи сигнала в данном диапазоне.
- Изучение основных физических принципов работы и технологии изготовления современных электронных вакуумных и твердотельных приборов СВЧ диапазона;
- Освоение методов расчета и определения важнейших параметров СВЧ электронных приборов, линий передачи СВЧ сигналов и интегральных схем.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
ПК-1 Способен применять фундаментальные представления о физических явлениях и процессах, лежащих в основе	ПК-1.1. Знает фундаментальные явления и процессы, лежащие в основе работы приборов, схем и устройств электроники, наноэлектроники, нано- и микросистемной	<i>ЗНАТЬ: современные тенденции развития электроники СВЧ, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности.</i>	Вопросы по темам/разделам дисциплины. Комплект задач и

работы приборов, схем и устройств электроники, наноэлектроники, нано- и микросистемной техники для достижения требуемых функциональных характеристик	<p>техники;</p> <p>ПК-1.2. Имеет фундаментальные представления о физических явлениях и процессах, лежащих в основе работы приборов, схем и устройств электроники, наноэлектроники, нано- и микросистемной техники для достижения требуемых функциональных характеристик;</p> <p>ПК-1.3. Владеет навыками анализа и расчета физических явлений и процессов, лежащих в основе работы приборов, схем и устройств электроники, наноэлектроники, нано- и микросистемной техники для достижения требуемых функциональных характеристик</p>	<p>УМЕТЬ: Учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в области сверхвысоких частот.</p> <p>ВЛАДЕТЬ: навыками использования теоретических основ и базовых разделов развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в области сверхвысоких частот.</p>	<p>заданий к лабораторному практикуму.</p> <p>Фонд тестовых заданий</p>
--	--	---	---

3. Структура и содержание дисциплины «СВЧ-электроника»

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	2 ЗЕТ
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	16
- лабораторный практикум	16
- контроль самостоятельной работы	1
самостоятельная работа	39 (работа в семестре)
Промежуточная аттестация	зачет

3.2 Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины , форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе					
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них					Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
1. Введение. Особенности конструирования приборов и схем СВЧ электроники.	6	2	-	-	-	2	4
2. Волноводные передающие линии в СВЧ диапазоне.	11	2	-	4	-	6	5
3. Основные приборы вакуумной СВЧ электроники. Усилители и генераторы СВЧ.	6	2	-	-	-	2	4
4. Методы анализа СВЧ приборов и передающих линий.	12	2		4	-	6	6
5. Основы твердотельной СВЧ электроники. Фазовращатели, фильтры, циркуляторы СВЧ.	8	2	-	-	-	2	6
6. Полосковые и микрополосковые передающие линии. Создание интегральных схем.	6	2	-	-	-	2	4
7. СВЧ электроника на основе гетероструктур.	11	2		4	-	6	5
8. Элементы СВЧ тракта. Направленные ответвители. Антенны.	11	2	-	4	-	6	5
Промежуточная аттестация: Зачет							

Содержание разделов дисциплины:

1. Особенности конструирования приборов и схем СВЧ электроники.
Особенности сверхвысокочастотной электроники. Стационарные уравнения возбуждения линии передачи электронным потоком. Нестационарная теория возбуждения волновода.
2. Волноводные передающие линии в СВЧ диапазоне.
 - 2.1. Пассивные и активные элементы полупроводниковых схем. Линии с распределенными параметрами. Волновое сопротивление. Полые волноводы и резонаторы, диэлектрические волноводы.
 - 2.2. Эквивалентные схемы, добротность. Потери в передающих линиях. Сосредоточенные резисторы.
3. Основные приборы вакуумной СВЧ электроники. Усилители и генераторы СВЧ.
 - 3.1. Индуцированное и спонтанное излучение в резонансных автогенераторах. Магнетрон, амплитрон, гиратрон.
 - 3.2. Взаимодействие электронного потока с бегущей электромагнитной волной. Теория лампы бегущей и обратной волны.

4. Методы анализа СВЧ приборов и передающих линий.
 - 4.1. Построение диаграмм Вольперта-Смита. Расчет нагрузочного сопротивления с помощью диаграммы Вольперта-Смита. Метод матриц рассеяния и матриц переноса. Принцип взаимности.
5. Основы твердотельной СВЧ электроники. Фильтры, фазовращатели, циркуляторы СВЧ.
 - 5.1. Принцип действия полевого транзистора с затвором Шоттки, основные режимы работы. Коэффициент усиления. Усилители с распределенным усилением. Согласование усилителей. Каскадное соединений секций. Нелинейные искажения.
 - 5.2. Туннельный диод, вольт-амперные характеристики и частотные свойства. Лавинно-пролетный диод, механизм усиления переменного сигнала, мощность и коэффициент полезного действия.
 - 5.3. Диоды Ганна, принцип действия и возможные режимы работы. Коаксиальный генератор Ганна. Волноводный генератор Ганна. Преобразование частоты с помощью активного элемента. Зеркальная частота. Смесители на полевых транзисторах с затвором Шоттки.
 - 5.4. Фильтры высоких и низких частот. Полосовые фильтры. Полосно-заграждающие фильтры. Инверторы сопротивлений, ферритовые СВЧ-устройства, Y – циркуляторы.
 - 5.5. Незаимные фазовращатели, двухплечий гиратор. Преобразователи сопротивлений и видов колебаний. Устройства СВЧ на p-i-n диодах.
6. Полосковые и микрополосковые передающие линии. Создание интегральных схем.
 - 6.1. Микрополосковые линии, щелевые линии, компланарный волновод. Заземляющая плоскость. Связанные микрополосковые линии.
 - 6.2. Режимы распространения волн. Распределение волны в линии, коэффициент отражения, коэффициент стоячей волны (КСВ).
7. СВЧ электроника на основе гетероструктур.
 - 7.1. Гетероэпитаксиальные структуры, квантовые ямы, двумерный электронный газ, подвижность носителей, плотность состояний, коэффициента шума.
 - 7.2. Сверхрешетки, осцилляции Блоха, резонансное туннелирование, резонансно-туннельный диод. НЕМТ-транзисторы.
8. Элементы СВЧ тракта. Направленные ответвители. Антенны.
 - 8.1. Устройства сотовой и спутниковой связи, телевидения. КМОП-схемы. Программируемые логические схемы на основе GaAs pHEMT-транзисторов. Малошумящие транзисторы для приемных каналов и мощные усилительные модули. Приемопередающие модули АФАР.

Лабораторный практикум

Практическая часть курса построена в виде лабораторного практикума, позволяющего привить практические навыки работы с аналоговыми и цифровыми радиотехническими устройствами. Практикум включает следующие лабораторные работы:

№п/п	№ раздела дисциплины	Наименование лабораторных работ
1.	1,2, 3	Основные принципы амплитудной и частотной модуляции
2	2,4,5,6	Исследование входного сопротивления отрезка длинной линии
3	5,8	Определение коэффициента усиления по мощности и коэффициента шума биполярного транзистора в СВЧ-диапазоне
4	1,8	Измерение основных параметров варикапа

4. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине проводят в лекционной форме, в форме лабораторных занятий, а также в форме самостоятельной работы студентов. На лекциях студенты знакомятся с основными тенденциями развития элементной базы электроники СВЧ диапазона, параметрами быстродействия этих элементов, принципиальными физическими и технологическими ограничениями. На лабораторных занятиях студенты приобретают практические навыки проведения измерений различных проявлений физических процессов, используемых в элементах и приборах микро- и нанoeлектроники.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

Самостоятельная работа студентов включает активное изучение лекционного материала вместе с соответствующими разделами учебных и учебно-методических пособий, в том числе с использованием систем компьютерной графики и электронных образовательных ресурсов. Одной из основных задач самостоятельной работы является подготовка к проведению допуска по лабораторным работам, обсуждения способов достижения конечного результата, решения поставленной в работе задачи и подготовка отчета.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя текущие отчеты по лабораторным работам, обсуждение полученных результатов с преподавателем, возможное повторное измерение отдельных величин, проведение компьютерного моделирования работы исследуемого устройства.

Аттестация включает зачет в шестом семестре, включающий в себя теоретические вопросы, по темам, указанным в пункте «Содержание разделов дисциплины».

Вопросы для самоконтроля:

1. Особенности конструирования приборов и схем сверхвысокочастотной электроники.
2. Распространение волн в полых волноводах. Режимы распространения волн в волноводе. Понятие критической длины волны. Типы волн.
3. Волны в прямоугольных и цилиндрических волноводах. Понятие волнового сопротивления.
4. Волноводы открытого типа. Диэлектрические волноводы.
5. Волны в коаксиальных волноводах. Возбуждение волноводов.
6. Полосковые и микрополосковые волноводы и резонаторы.
7. Методы анализа СВЧ тракта. Понятие матрицы рассеяния. Диаграмма Вольперта-Смита. Коэффициент стоячей волны.
8. Сравнительные характеристики передающих линий. Диапазон волновых сопротивлений.
9. Понятие объемного резонатора. Классификация резонаторов.
10. Волновые моды в резонаторах. Собственная и нагруженная добротность резонаторов.
11. Прямоугольный и цилиндрический резонатор закрытого типа.
12. Взаимодействие электронного потока с электромагнитным полем. Понятие наведенного тока.
13. Модуляция электронного потока по скорости. Принцип работы пролетного двухрезонаторного клистрона.
14. Элементарная теория отражательного клистрона.
15. Условия возбуждения и генерации колебаний в электронных СВЧ-приборах .

16. Периодические замедляющие системы. Пространственные гармоники.
17. Понятие синхронизма. Лампа бегущей волны. Принцип работы.
18. Взаимодействие электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях с ВЧ-полем. Основные принципы работы магнетрона.
19. Принцип действия лампы обратной волны.
20. Волны в диэлектрических резонаторах. Колебания в сферическом резонаторе.
21. Диэлектрические резонаторы различной формы. Влияние формы и отверстия на частотный спектр.
22. Фильтры на диэлектрических резонаторах.
23. СВЧ фильтры высоких и низких частот. Полосовые фильтры, ППФ, ПЗФ.
24. Преобразователи сопротивлений и видов колебаний. Фазовращатели и аттенюаторы СВЧ.
25. Полупроводниковые СВЧ генераторы и усилители.
26. Полевой транзистор Шоттки. Двухзатворные полевые транзисторы.
27. Устройства СВЧ на р-і-п диодах.
28. Волноводный генератор Ганна. Коаксиальный генератор Ганна.
29. Элементы СВЧ тракта. Направленные ответвители. Антенны.
30. Вопросы согласования СВЧ тракта. Трансформаторы сопротивлений.
31. Гетеропереходы: зонные диаграммы, двумерный электронный канал, подвижность двумерного электронного газа.
32. Генератор на резонансно туннельном диоде.
33. Электрофизические параметры НЕМТ –транзисторов. Частотные свойства.
34. Квантовые генераторы и усилители.
35. Принцип действия полупроводникового лазера.
36. Области применения вакуумной и твердотельной СВЧ электроники

Методическое обеспечение:

1. Исследование амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик электрических LC- фильтров низких и высоких частот. Методическая разработка к лабораторной работе. / Сост. В.Н.Шабанов. – Изд-во ННГУ, Н. Новгород, 1992. – 10 с.
2. Исследование входного сопротивления отрезка длинной линии. Методическое руководство к лабораторной работе. / Сост. Е.С. Демидов, В.В. Сдобняков, В.Н.Шабанов. – Изд-во ННГУ, Н. Новгород, 2007. – 17 с.
3. Определение коэффициента усиления по мощности и коэффициента шума биполярного транзистора в СВЧ-диапазоне. Методическое руководство к лабораторной работе. / Сост. Е.С.Демидов, В.В.Шабанов, В.В.Сдобняков. – Изд-во ННГУ, Н. Новгород, 2007. – 16 с.
4. Измерение основных параметров варикапа. Методическая разработка к лабораторной работе/ – Изд-во ННГУ, Н. Новгород, 2006. – 11 с.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина, с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

Уровень	Шкала оценивания сформированности компетенций
---------	---

сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	Не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки . Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько незначительных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки , без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений . Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами .	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи . Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельным и незначительным недочетом , выполнены все задания в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения., Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

6.2. Описание шкал оценивания.

Промежуточная аттестация проводится в форме зачета. Форма проведения – индивидуальное собеседование. Учитываются результаты сдачи студентом промежуточных отчетов по лабораторным занятиям. Контроль текущей успеваемости

включают в себя текущие отчеты по лабораторным работам, обсуждение полученных результатов с преподавателем. Используется шкала оценивания «зачет-незачет»

6.3. Критерии оценивания результатов обучения для проведения аттестации обучающихся по дисциплине.

Для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций, используются билеты, состоящие из 2-х вопросов, составленных на основе контрольных вопросов (п. 5) и задачи. При проведении зачета учитываются результаты выполнения лабораторных работ.

Критерии выставления оценки при сдаче зачета

Аттестация по дисциплине проходит в виде зачета по результатам шестого семестра в виде индивидуального собеседования.

Критерии оценок зачета:

зачтено - владение программным материалом, понимание сущности работы приборов и схем сверхвысокочастотной электроники.

незачтено - полное непонимание основ курса и базовых понятий.

6.4. Типовые контрольные задания и материалы заданий практических занятий, необходимые для оценки результатов обучения.

1. Основные типы линий передач СВЧ-сигналов.
2. Спектр амплитудно-модулированного сигнала для однотоновой модуляции.
3. Коэффициент стоячей волны (КСВ) в режиме короткого замыкания и режиме холостого хода в длинной линии.
4. КСВ в режиме короткого замыкания и режиме холостого хода в длинной линии. Определение КСВ в волноводе.
5. Типы волн, распространяющихся в волноведущих системах. Определение ТМ и ТЕ типов электромагнитных волн.
6. Определение критической частоты и длины волны в волноводе.
7. Волновое сопротивление вакуумного волновода, коаксиального кабеля.
8. Понятие низшей моды волновода. Нахождение частоты основной моды прямоугольного волновода.
9. Понятие объемного резонатора. Нахождение спектра частот прямоугольного и цилиндрического объемных резонаторов.
10. Устройство двухрезонаторного пролетного клистрона.
11. Принцип модуляции потока частиц по скорости.
12. Зависимость фазовой скорости электромагнитной волны от частоты в вакуумном волноводе.
13. Понятие синхронизма в периодических замедляющих волноведущих системах.
14. Устройство полевого транзистора Шотки.
15. Распределение поля в полосковых и микрополосковых волноводах и резонаторах.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «СВЧ электроники»

основная литература:

1. Шостак, А.С. Техническая электродинамика, Основы электродинамики и распространение радиоволн, Антенны и устройства СВЧ [Электронный ресурс] : учеб.пособие / А.С. Шостак, В.С. Корогодов, В.Г. Козлов. — Электрон.дан. — Москва : ТУСУР, 2012. — 137 с. —

Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/10907>.

2. Устройства СВЧ и антенны [Электронный ресурс] : учебник / А. А. Филонов, А. Н. Фомин, Д. Д. Дмитриев [и др.] ; ред. А. А. Филонов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. – 492 с.
- ISBN 978-5-7638-3107-8 –

Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=505864>

3. Куш Г.Г. Приборы и устройства оптического и СВЧ диапазонов [Электронный ресурс] : учеб.пособие / Г.Г. Куш, Ж.М. Соколова, Л.И. Шангина. — Электрон.дан. — Москва : ТУСУР, 2012. — 414 с.
Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/4953>

б) дополнительная литература:

1. Собенин Н.П. Практикум по курсу "Техника СВЧ": учебное пособие для вузов [Электронный ресурс] : учеб.пособие / Н.П. Собенин, М.В. Лалаян, М.А. Гусарова. — Электрон.дан. — Москва : НИЯУ МИФИ, 2010. — 128 с.
Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/75754>
2. Груздов В.В. Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике [Электронный ресурс] / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой. — Электрон.дан. — Москва : Техносфера, 2016. — 328 с.
Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/87740>.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины «СВЧ электроники»

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

Лабораторный практикум проводится в специализированной аудитории, оснащенной измерительным оборудованием, средствами вычислительной техники, источниками питания и макетами лабораторных устройств. Программное обеспечение, управляющее лабораторными макетами, осуществляется в среде программирования LabView.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника».

Автор:

доцент кафедры физики полупроводников,
электроники и наноэлектроники, к.ф.-м.н., Хазанова С.В.

Рецензент:

заведующий кафедрой
теоретической физики, д.ф.-м.н.

В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой
физики полупроводников, электроники
и наноэлектроники, д.ф.-м.н., профессор

Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «20» мая 2023 г.

Председатель Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ

А. А. Перов