

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»  
(РУДН)*

*Факультет физико-математических и естественных наук  
Институт физических исследований и технологий*

Рекомендовано МССН

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

### **ОСНОВЫ ФИЗИКИ СВЧ**

**Рекомендуется для направления подготовки/специальности  
03.03.02 «Физика»**

**Квалификация (степень) выпускника  
бакалавр**

**1. Цели и задачи дисциплины:** дать студентам базовые знания по основам работы и принципам устройства различных СВЧ линий передач и устройств, в том числе по теории СВЧ цепей. Дисциплина нацелена на формирование у выпускника способности проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и теоретических физических исследований и применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин.

**2. Место дисциплины в структуре ООП:**

Дисциплина «Основы физики СВЧ» относится к дисциплинам вариативной части образовательной программы по направлению 03.03.02 – Физика. Изучение дисциплины базируется на следующих дисциплинах образовательной программы бакалавра по направлению: на модуле «Математика» базовой части цикла математических и естественнонаучных дисциплин, модуле «Общая физика», модуле «Теоретическая физика» базовой части цикла математических и естественнонаучных дисциплин, дисциплинах вариативной части профессионального цикла, «Теория колебаний и волн».

В таблице № 1 приведены предшествующие и последующие дисциплины, направленные на формирование компетенций дисциплины в соответствии с матрицей компетенций ОП ВО.

Таблица № 1

**Предшествующие и последующие дисциплины, направленные на формирование компетенций**

№ п/п	Шифр и наименование компетенции	Предшествующие дисциплины	Последующие дисциплины (группы дисциплин)
1	ОПК-2: способность проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.	Модули «Общий физический практикум», Вычислительная физика», Радиоэлектроника	Физические методы исследований
2	ПК-2: способность проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта		

**3. Требования к результатам освоения дисциплины:**

В результате изучения дисциплины студент должен:

**Знать:** Физические основы и математические методы, необходимые для понимания и предсказания поведения плазмы.

**Уметь:** исходя из известной микроструктуры плазмы, объяснить механизм различных процессов, которые проходят в этой среде.

**Владеть:** методами усреднения для получения приближенных уравнений движения заряженной частицы в НЧ и ВЧ электромагнитных полях.

**4. Объем дисциплины и виды учебной работы**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетные единицы.

Вид учебной работы	Всего часов	Семестр (модуль)	
		9	А
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	<b>51</b>	<b>27</b>	<b>24</b>
В том числе:			
Лекции	17	9	8
Практические занятия (ПЗ)			
Семинары (С)	34	18	16
Лабораторные работы (ЛР)			
<b>Самостоятельная работа (всего)</b>	<b>93</b>	<b>9</b>	<b>84</b>
<i>Другие виды самостоятельной работы</i>			
Изучение литературы по дисциплине			
Самостоятельное решение задач по дисциплине			
Вид промежуточной аттестации (зачет, экзамен)			
Общая трудоемкость, час	<b>144</b>	<b>36</b>	<b>108</b>
зач. ед.	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>3</b>

## 5. Содержание дисциплины

### 5.1. Содержание разделов дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела
1	Введение	Предмет и задачи курса. Значение вакуумной СВЧ электроники для решения важных проблем электроники больших мощностей, а также в техническом освоении коротковолнового диапазона волн. Физические основы электроники СВЧ: особенности работы электронных устройств с кратковременным (частотный резонанс) и длительным (пространственный резонанс) взаимодействием электронного пучка и электромагнитного поля; скоростная модуляция и фазировка. Основные уравнения электроники – уравнения движения электронов Лоренца, макроскопические уравнения Максвелла, плотности токов и зарядов. Лабораторные источники СВЧ мощности.
2	Усилительный клистрон.	Теория группирования электронов в приборах клистронного типа. Исходные положения. Взаимодействие электронов с СВЧ полем в зазоре тороидального резонатора. Мощность взаимодействия СВЧ поля с электронным потоком в зазоре. Ток конвекции и наведенный ток. Баланс мощностей в стационарном режиме.
3	Двухрезонаторный пролетный клистрон – СВЧ усилитель.	Общая характеристика явлений. Движение электронов в пространстве дрейфа пролетного клистрона. Параметры группирования. Динамический угол пролета, фаза группировки. Гармонический состав конвекционного тока электронов, группирующихся в пространстве дрейфа. Выходная мощность, теоретический электронный КПД. Многорезонаторный и умножительный пролетные клистроны. Типичные технические параметры и область применения клистронов.
4	Отражательный клистрон – СВЧ	Принципиальная схема устройства. Сущность физических явлений в отражательном клистроне (ОК). Движение

	генератор.	электронов в ОК. Углы пролета, параметр группирования и фаза группировки. Гармонический состав тока конвекции в ОК. Оценка выходной мощности и электронный КПД.
5		Эквивалентная схема ОК – одноконтурного генератора. Закон сохранения энергии в форме комплексных проводимостей для ОК. Баланс активных и реактивных мощностей и его применение для нахождения амплитуды установившихся колебаний и электронного смещения частоты. Зоны генерации, электронная перестройка и ее крутизна. Конструкции ОК, технические параметры и типичные применения.
6	Нерезонансные замедляющие структуры.	Медленные электромагнитные волны над поверхностью диэлектрика и металла с конечной проводимостью. Три типа волноведущих систем. Однородные и неоднородные замедляющие структуры. Прямые и обратные пространственные гармоники. Групповая и фазовая скорости медленных волн. Нормальная и аномальная частотные дисперсии фазовой скорости.
7		Замедляющие системы типа "диафрагмированного волновода" и "гребенки". Вывод характеристического уравнения, коэффициента замедления и распределения полей в этих системах. Неоднородные структуры типа "встречных штырей".
8	Принципы работы усилительной ЛБВ и генераторной ЛОВ.	Схематическое устройство усилительной ЛБВ и ее технические параметры. Схематическое устройство генераторной ЛОВ. Амплитудные и фазовые условия самовозбуждения. Прямые и обратные гармоники. Цепь обратной связи. Возможности плавной широкополосной перестройки частоты генерации. Основные параметры ЛОВ и ее применение.
9	Линейная теория ЛБВ типа О.	Основные положения линейной теории. Электронные волны – как результат сильной связи медленной синхронной волны и электронного пучка. Вывод самосогласованной системы уравнений для определения комплексного продольного волнового числа и функции поперечного распределения тока конвекции пучка в электронной волне.
10		Усредненные поля и характеристическое уравнение. Физические параметры теории: эффективная площадь поперечного сечения электронного пучка, удельное сопротивление связи пучка и волны, коэффициент депрессии сил пространственного заряда, усредненные по двум взаимодействующим сечениям электронного пучка нормальная и аномальная функции Грина, параметр усиления. Свойства функций Грина и их влияние на величину коэффициента депрессии и его зависимость от продольного волнового числа. Волны пространственного заряда. Редуцированная плазменная частота. Причины пространственной дисперсии.
11		Анализ решений характеристического уравнения в линейном приближении. Область параметров, зависящих от свойств замедляющей структуры и пучка, где существуют нарастающие электронные волны. Влияние

		пространственного заряда на структуру и свойства электронных волн. Механизм идеальной фазировки в ЛБВ.
12-13	Приборы магнетронного типа - генераторы и усилители СВЧ колебаний на основе криволинейных электронных пучков.	Многорезонаторный магнетрон. Виды траекторий электронов, синхронизм, образование сгустков, виды колебаний ( $\pi$ -вид), структура СВЧ поля в пространстве взаимодействия. Механизм передачи энергии электронов ВЧ полю. Частотный диапазон применения, уровень мощности, КПД, область применения. Методы борьбы с перескоками частоты.
14		Коаксиальные магнетроны и ниготроны. Схемы устройства этих приборов и структура распределения в них электромагнитных полей. Платинотроны, ЛБВ и ЛОВ М-типа. Схемы устройства амплитрона, карматрона и ЛОВ типа - М и принципы работы. Технические параметры.
15	Элементарная теория магнетрона.	Плоский магнетрон (планотрон). Дрейфовое приближение и условия его применимости. Движение электронов в скрещенных статических электрическом и магнитном полях в плоском магнетроне. Учет влияния на движение электронов СВЧ полч синхронной медленной волны. Фазировка в магнетронных приборах: траектории ведущих центров, образование электронных сгустков - язычков, механизмы фазовой фокусировки и энергетических превращений при идеальном синхронизме. Влияние расстройки скоростей электронов и фазовой скорости медленной волны на дрейф, форму язычков и анодный ток и КПД. Устойчивость генерации.
16	Антенные измерения.	Свойства и параметры антенн. Наиболее распространенные типы антенн. Типичные пространственные диаграммы направленности антенн: изотропный излучатель, вибратор Герца и решетка таких вибраторов, плоские излучатели и направленные излучатели. Усиление и эффективная площадь антенн. Диаграмма направленности ее расчет. Уравнение Кирхгофа, Вычисления полей в ближней и дальней зонах плоских антенн. Экспериментальные методы измерения усиления, эффективной площади и диаграммы направленности. Методы идентичных и эталонных антенн.
17	Современные задачи и перспективы развития высокочастотной электроники	Современные задачи и перспективы развития высокочастотной электроники

## 5.2. Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Лекц.	Практ. зан.	Лаб. зан.	Семина.	СРС	Всего час.
1.	Введение	1			2	2	5
2.	Усилительный клистрон.	1			2	3	6
3	Двухрезонаторный пролетный клистрон – СВЧ усилитель.	1			2	3	6
4-5	Отражательный клистрон – СВЧ генератор.	2			4	6	12

6-7	Нерезонансные замедляющие структуры.	2			4	6	12
8	Принципы работы усилительной ЛБВ и генераторной ЛОВ.	1			2	6	9
9-11	Линейная теория ЛБВ типа О.	3			6	9	18
12-14	Приборы магнетронного типа - генераторы и усилители СВЧ колебаний на основе криволинейных электронных пучков.	3			6	9	18
15	Элементарная теория магнетрона.	1			2	6	9
16	Антенные измерения.	1			2	4	7
17	Современные задачи и перспективы развития высокочастотной электроники	1			2	3	6
	<b>ИТОГО</b>	<b>17</b>			<b>34</b>	<b>57</b>	<b>108</b>

**6. Лабораторный практикум не предусмотрен учебным планом**

### **7. Практические занятия (семинары)**

№ п/п	№ раздела дисциплины	Тематика практических занятий (семинаров)	Трудоемкость (час.)
1.	2.	Усилительный клистрон.	2
2.	3	Двухрезонаторный пролетный клистрон – СВЧ усилитель.	2
3.	4-5	Отражательный клистрон – СВЧ генератор.	4
4.	6-7	Нерезонансные замедляющие структуры.	4
5.	8	Принципы работы усилительной ЛБВ и генераторной ЛОВ.	2
6.	9-11	Линейная теория ЛБВ типа О.	6
7.	12-14	Приборы магнетронного типа - генераторы и усилители СВЧ колебаний на основе криволинейных электронных пучков.	6
8.	15	Элементарная теория магнетрона.	2
9.	16	Антенные измерения.	2
10.	17	Современные задачи и перспективы развития высокочастотной электроники	2

**8. Примерная тематика курсовых проектов (работ) не предусмотрены учебным планом**

### **9. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины:**

#### **Обязательная**

1. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
2. Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот: В 2-х т.: Коллективная монография. Т. 2: Нестационарные и хаотические процессы / Под ред. А.А. Короновского, Д.И. Трубецкова, А.Е. Храмова. – М.: Физматлит, 2009. – 392 с.

### **Дополнительная**

1. Гудзенко А.И., Николаев Н.Э. Лабораторная работа № 20. Угломерные системы СВЧ [Электронный ресурс] : Учебно-методическое пособие: Для студентов 4 курса, обучающихся по специальности "Радиофизика и электроника". - М.: Изд-во РУДН, 2009. - 28 с. - электронный ресурс
  2. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Советское радио, 1973.
  3. Гайдук В.И., Палатов К.И., Петров Д.М. Физические основы электроники СВЧ. М.: Советское радио, 1971.
  4. Лебедев И.В. Техника и приборы сверхвысоких частот, Т.І. и Т.ІІ. М.: Энергия, 1964.
  5. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах. М.: Гос. Изд-во физ.-мат. лит., 1963.
  6. Гинзтон Э.Л. Измерения на сантиметровых волнах. М.: И.Л., 1960.
  7. Капица П.Л. Электроника больших мощностей, сб.1. М.: Наука, 1960.
  8. Силин Р.А., Сазонов В.П.Замедляющие системы. М.: Советское радио, 1966.
- Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы*
- <http://www.eps.org/> – Европейское физическое общество.  
<http://www.kipt.kharkov.ua/.index.html> – национальный научный центр. Харьковский физико-технический институт.  
<http://www.aip.org/>– американский институт физики  
<http://top.msu.ru/> - каталог научно-образовательных ресурсов МГУ  
<http://www.physics-words.com/> - толковые словари по физике  
<http://www.phys.nsu.ru/> - сайт физического факультета Новосибирского государственного университета  
<http://psj.nsu.ru/> - центр инновационных образовательных технологий Новосибирского государственного университета  
<http://www.iop.org/> - web-сайт Международного Института Физики  
<http://physics.nist.gov/lab.html> - физическая лаборатория Национального института стандартов и технологий США (включая базы экспериментальных данных)  
<http://www.vacuum.ru/> - (Рос вакуумное общество)  
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html> - таблицы баз данных рентгеновской спектроскопии (институт стандартизации и технологий США)

### **10. Материально-техническое обеспечение дисциплины:**

Лекционный компьютер, мультимедийный проектор, интерактивная доска, лицензионное ПО: Microsoft Office (Word Excel PowerPoint), Adobe Acrobat 8.0 Pro, Maple, MatLab и MathCad, Simulink. Дисплейный класс для проведения занятий.

### **11. Методические рекомендации по освоению дисциплины:**

Необходимо обеспечить себя рекомендованными учебными материалами. Для получения глубоких и прочных знаний, твердых навыков и умений необходима, кроме проработки лекционного материала, систематическая самостоятельная работа студента. Дополнить конспект лекций, выделить главное студент должен самостоятельно, пользуясь предлагаемыми учебными пособиями.

Самостоятельная работа нужна для усвоения лекционного (теоретического) материала. Студентам предлагается делать самостоятельные доклады с использованием источников из обязательной части литературы.

### **12. Фонд оценочных средств по дисциплине**

**Паспорт фонда оценочных средств по дисциплине «Основы физики СВЧ»**

Направление/Специальность: 03.03.02 Физика

Код контролируемой компетенции или ее части	Контролируемый раздел дисциплины	Контролируемая тема дисциплины	Наименование оценочного средства						Баллы темы	Баллы раздела
			Текущий контроль			Промежуточная аттестация				
			Опрос	Тест	Выполнение ДЗ	Реферат	Экзамен/Зачет	...		
ПК-1	Физические основы электроники СВЧ	Особенности работы электронных устройств с кратковременным (частотный резонанс) и длительным (пространственный резонанс) взаимодействием электронного пучка и электромагнитного поля; скоростная модуляция и фазировка	1				1		2	2
ПК-1	Приборы с кратковременным взаимодействием прямолинейного электронного пучка с ВЧ полем	Усилительный клистрон					1		1	20
		Мощность взаимодействия СВЧ поля с электронным потоком в зазоре усилительного клистрона	1				1		2	
		Двухрезонаторный пролетный клистрон – СВЧ усилитель					1		1	
		Параметры группирования. Динамический угол пролета, фаза группировки	1				1		2	
		Отражательный клистрон – СВЧ генератор			5		2		7	



		Зоны генерации, электронная перестройка и ее крутизна		5			2		7	
Физические принципы приборов СВЧ, основанных на длительном взаимодействии с группировкой электронов благодаря скоростной модуляции в нерезонансных замедляющих структурах		Нерезонансные замедляющие структуры			5		1		6	25
		Однородные и неоднородные замедляющие структуры.	1				2		3	
		Прямые и обратные пространственные гармоники. Групповая и фазовая скорости медленных волн					1		1	
		Замедляющие системы типа «диафрагмированного волновода» и «гребенки».			5		1		6	
		Неоднородные структуры типа «встречных штырей».	1				1		2	
		Принципы работы усилительной ЛБВ и генераторной ЛОВ	1				1		2	
		Прямые и обратные гармоники. Цепь обратной связи	1				1		2	
		Линейная теория ЛБВ типа О	1				1		2	
		Механизм идеальной фазировки в ЛБВ					1		1	
Физические основы приборов СВЧ, основанных на движении электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях		Приборы магнетронного типа - генераторы и усилители СВЧ колебаний на основе криволинейных электронных пучков					1		1	38
		Многорезонаторный магнетрон. Виды траекторий электронов, синхронизм, образование сгустков	1				1		2	
		Виды колебаний ( $\pi$ -вид), структура СВЧ поля в пространстве взаимодействия					1		1	
		Механизм передачи энергии электронов ВЧ полю. Частотный диапазон применения, уровень мощности, к.п.д., область применения					1		1	
		Элементарная теория магнетрона			5		1		6	

	Движение электронов в скрещенных статических электрическом и магнитном полях в плоском магнетроне		5			2		7	
	Фазировка в магнетронных приборах: траектории ведущих центров, образование электронных сгустков					1		1	
	Устойчивость генерации					1		1	
	Антенные измерения					2		2	
	Свойства и параметры антенн. Наиболее распространенные типы антенн			5		1		6	
	Изотропный излучатель, вибратор Герца и решетка таких вибраторов, плоские излучатели и направленные излучатели	1				1		2	
	Диаграмма направленности ее расчет					2		2	
	Экспериментальные методы измерения усиления, эффективной площади и диаграммы направленности			5		1		6	
	<b>Итого:</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>35</b>		<b>85</b>	<b>85</b>

**Вопросы для самопроверки по дисциплине  
«Основы физики СВЧ»**

1. Линии передачи разделяются на следующие классы:
  - а) закрытого типа;
  - б) открытого типа;
  - в) комбинированного типа;
  - г) другой ответ.
  
2. Линии передачи классифицируются:
  - а) проволочные;
  - б) волноводные;
  - в) комбинированные;
  - г) другой ответ.
  
3. Волноводные линии передачи могут быть:
  - а) двухпроводными;
  - б) прямоугольного сечения;
  - в) полосковыми;
  - г) другой ответ.
  
4. Для многосвязной линии передачи характерными являются следующие типы волн:
  - а)  $H$  -волны;
  - б)  $HE$  -волны;
  - в)  $E$  -волны;
  - г) другой ответ.
  
5. Для односвязных линий передачи характерными являются следующие типы волн:
  - а)  $H$  -волны;
  - б)  $T$  -волны;
  - в)  $E$  -волны;
  - г) другой ответ.
  
6. Коаксиальная линия передачи отличается от прямоугольного волновода:
  - а) наличием двух разнесенных в пространстве проводников;
  - б) одного общего проводника;
  - в) двух концентрически расположенных проводников;
  - г) другой ответ.
  
7. Полосковые линии передачи бывают следующих типов:
  - а) компланарные;
  - б) нерегулярные;
  - в) регулярные;
  - г) другой ответ.
  
8. Какие из перечисленных линий передачи относятся к односвязным?
  - а) двухпроводная;
  - б) коаксиальная;
  - в) полосковая;
  - г) другой ответ.
  
9. Модификациями полосковых линий являются:
  - а) коаксиальные;

- б) щелевые;
- в) волноводные;
- г) другой ответ.

10. Какие волны могут возбуждаться в прямоугольном волноводе?

- а)  $H_{10}$  ;
- б)  $H_{00}$ ;
- в)  $E_{11}$  ;
- г) другой ответ?

11. Критическая длина волны в прямоугольном волноводе не зависит от:

- а) поперечных размеров волновода;
- б) длины волновода;
- в) типа волны;
- г) другой ответ.

12. Какой из типов волн является основным в прямоугольном волноводе?

- а)  $H_{01}$  ;
- б)  $E_{10}$  ;
- в)  $H_{10}$  ;
- г) другой ответ.

13. Какой из перечисленных металлических волноводов имеют наиболее широкую полосу пропускания?

- а) круглый;
- б) П – образный;
- в) эллиптический;
- г) другой ответ?

14. Диэлектрический волновод является волноводом:

- а) быстрых волн;
- б) медленных волн;
- в) ускоренных волн;
- г) другой ответ.

15. В диэлектрическом волноводе основное поле сконцентрировано:

- а) в поперечном сечении;
- б) вблизи поверхности;
- в) в окружающем пространстве;
- г) другой ответ.

16. В каком диапазоне длин волн могут использоваться полые металлические волноводы?

- а) сантиметровом;
- б) миллиметровом;
- в) оптическом;
- г) другой ответ.

17. В каком из диапазонов длин волн могут использоваться диэлектрические волноводы?

- а) метровом;
- б) миллиметровом;
- в) субмиллиметровом;
- г) другой ответ.

18. В каком из диапазонов длин волн могут использоваться волоконные световоды?

- а) сантиметровом;
- б) дециметровом;
- в) оптическом;
- г) другой ответ.

19. Для каких из волноводов не характерно понятие критической частоты  $f_{кр}$  (критической длины волны  $\lambda_{кр}$ )?

- а) коаксиальных;
- б) прямоугольных металлических;
- в) круглых металлических;
- г) другой ответ.

20. Какие из неравенств справедливы для фазовой скорости волны ( $v_{\phi}$ ) в периодической замедляющей системе?

- а)  $v_{\phi} > c$  ;
- б)  $v_{\phi} = 0$ ;
- в)  $v_{\phi} < c$  ;
- г) другой ответ.

21. На базе каких линий передачи могут быть выполнены объёмные резонаторы?

- а) двухпроводной;
- б) коаксиальной;
- в) прямоугольной;
- г) другой ответ.

22. Какой из параметров объёмного резонатора является наиболее важным?

- а) полоса пропускания;
- б) собственная частота;
- в) добротность;
- г) другой ответ.

23. Стенки объёмного резонаторы могут быть выполнены из следующих материалов:

- а) проводников;
- б) полупроводников;
- в) ферромагнетиков;
- г) другой ответ.

24. Какие из резонаторов являются малогабаритными?

- а) объёмные;
- б) бегущих волн;
- в) диэлектрические;
- г) другой ответ.

25. Какое назначение антенны?

- а) излучение волны;
- б) приём волны;
- в) отражение волны;
- г) другой ответ.

26. По принципу действия антенны можно разделить на:

- а) нелинейные;

- б) линейные;
- в) апертурные;
- г) другой ответ.

27. Какие антенны не относятся к основным типам?

- а) антенные решётки;
- б) директорные антенны;
- в) зеркальные антенны;
- г) другой ответ.

28. Какую из перечисленных ниже систем можно считать квазиоптической?

- а) двухзеркальный открытый резонатор;
- б) линзовый волновод;
- в) полый металлический волновод;
- г) другой ответ.

29. В каком из перечисленных ниже устройств СВЧ образуется стоячая волна?

- а) бесконечном открытом волноводе;
- б) открытом резонаторе;
- в) объёмном резонаторе;
- г) другой ответ.

30. Какие из перечисленных ниже свойств характерны для квазиоптических систем?

- а) радиационное затухание большинства колебаний и волн;
- б) сгущение спектра собственных частот;
- в) разрежение спектра собственных частот;
- г) другой ответ.

### **Задачи (домашние задания) по дисциплине «Основы физики СВЧ»**

1. Вычислите критическую длину волны типа  $TE_{01}$  в прямоугольном волноводе с размерами  $23 \times 10$  мм (волновод  $R100$ ), если частота задающего генератора  $f = 9370$  МГц. Волновод заполнен воздухом.

2. Вычислите длину волны поля  $TM_{11}$  в прямоугольном волноводе с размерами  $7,1 \times 3,6$  мм (волновод  $R320$ ), если частота задающего генератора  $f = 8$  ГГц. Волновод заполнен кварцем плавленным ( $\epsilon' = 3,64$ ).

3. Вычислите фазовую скорость волны типа  $TE_{10}$  в прямоугольном волноводе, заполненном фторопластом, если рабочая частота генератора  $f = 4,6$  ГГц, размеры волновода  $47,5 \times 22,15$  мм (волновод  $R48$ ). Относительная диэлектрическая проницаемость фторопласта  $\epsilon' = 2,08$ .

4. Покажите, может ли распространяться электромагнитная волна типа  $TE_{12}$  в прямоугольном волноводе с размерами  $72 \times 34$  мм (волновод  $R32$ ), если рабочая частота генератора  $f = 2,9$  ГГц. Волновод заполнен воздухом.

5. Чему будет равна скорость переноса энергии поля типа  $TM_{11}$  вдоль прямоугольного волновода, заполненного плавленным кварцем ( $\epsilon' = 3,64$ ), если размеры волновода  $3,76 \times 1,88$  мм (волновод  $R620$ ), а рабочая частота генератора  $f = 52$  ГГц.

6. Вычислите мощность на выходе волновода круглого сечения, если суммарные потери в линии составляют 9,5 дБ. Мощность генератора 7 мВт.

7. Вычислите невозмущенный угол пролета электрона в зазоре между накаленным катодом и анодом в режиме насыщения диода, если расстояние между катодом и анодом  $d = 4$  мм, ускоряющее напряжение  $U_0 = 200$  В. Считать, что амплитуда переменного

напряжения на зазоре мала ( $U_m \ll U_0$ ), длина волны колебаний  $\lambda = 1,5$  см.

Пространственный заряд можно не учитывать.

8. Вычислите невозмущенный угол пролета электрона в зазоре длиной  $d = 6$  мм, если электроны поступают в зазор после ускорения под действием анодного напряжения  $U_0 = 250$  В. Длина волны колебаний в зазоре  $\lambda = 4,5$  см. Пространственный заряд оказывает существенное влияние на угол пролета.

9. Вычислите длину волны поля  $TE_{11}$  в прямоугольном волноводе с размерами  $28,5 \times 12,6$  мм (волновод R84), если частота задающего генератора  $f = 8,4$  ГГц. Волновод заполнен плавным кварцем ( $\epsilon' = 3,64$ ).

10. Будет ли распространяться волна типа  $TM_{21}$  в прямоугольном волноводе с размерами  $7,1 \times 3,6$  мм (волновод R320), если частота задающего генератора  $f = 37,5$  ГГц. Волновод заполнен фторопластом ( $\epsilon' = 2,1$ ).

11. Вычислите мощность генератора, к которому подключен волновод прямоугольного сечения, если суммарные потери в линии составляют 8 дБ. Мощность, регистрируемая на нагрузке – 1,2 мВт.

12. Вычислите коэффициент замедления спиральной линии, диаметр которой  $d = 2$  мм, спираль намотана с шагом  $s = 0,3$  мм.

### Тренинговые задания по дисциплине «Основы физики СВЧ»

1. При каких условиях возможно преобразование энергии электронного потока в энергию СВЧ колебаний?
2. Угол пролета? Как он влияет на характеристики лампы?
3. Пространственно-временная диаграмма (ПВД)? Изобразите ПВД движения электронов в триоде.
  1. Чем триоды СВЧ принципиально отличаются от обычных низкочастотных ламп?
  2. Области применения триодов и тетродов СВЧ.
  3. Принципиальная схема отражательного клистрона, принцип действия этого прибора.
  4. Зона генерации отражательного клистрона? Нарисуйте и объясните картину зон генерации в отражательном клистроне.
  5. Конвекционный, наведенный токи.
  6. Электронная перестройка в отражательном клистроне.
  7. Частотные характеристики отражательного клистрона?
  8. Виды клистронов и области применения.
  9. Принцип действия ЛБВ-О. Условие синхронизма?
  10. В чем заключается назначение ЗС? Объясните ее устройство. Какими параметрами она характеризуется.
  11. Что такое пространственные гармоники? Чем они отличаются друг от друга?
  12. Какими параметрами определяется коэффициент усиления ЛБВ-О?
  13. Чем объяснить широкополосный характер работы ЛБВ?
  14. Что ограничивает полосу пропускания ЛБВ?
  15. Фазовые характеристики ЛБВ?
  16. Классификация ЛБВ и их области применения.

### Дополнительные вопросы

1. Добротность колебательных систем. Колебательный контур, добротность его элементов (L, C).
2. Введение Особенности СВЧ. СВЧ приборы типа «О» и «М».
3. Полный ток в промежутке между электродами и во внешней цепи.
4. Отбор энергии от электронного потока.
5. Влияние конечного времени пролета электронов на работу триода СВЧ.

6. Конструкция триодов СВЧ.
7. Пролетный двухрезонаторный клистрон. (Конструкция, принципы работы, скоростная модуляция электронов, группирование электронов).
8. Наведенный ток, электронная мощность и КПД пролетный двухрезонаторного клистрона.
9. Параметры режима усиления клистрона. Многорезонаторные клистроны.
10. Лампа бегущей волны типа «О», ее конструкция, принцип ее работы.
11. Свойства замедляющих систем.
12. Принцип работы ЛБВ-О, ее конструкция, принцип ее работы.
13. Приборы типа «М».
14. Взаимодействие электронов и СВЧ поля.
15. Конструкция многорезонаторного магнетрона.
16. Виды колебаний анодного блока. Разделение вида колебаний.
17. Самовозбуждение магнетрона.
18. КПД магнетрона.
19. Другие виды приборы типа «М».
20. Рабочие и нагрузочные характеристики магнетронов.
21. Лазеры. Принципы возбуждения лазерного излучения.

## **Вопросы по разделам курса**

### **1. ЛАМПОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ**

- 1.1. При каких условиях возможно преобразование энергии электронного потока в энергию СВЧ колебаний?
- 1.2. Что такое угол пролета? Как он влияет на характеристики лампы?
- 1.3. Что такое пространственно-временная диаграмма (ПВД)? Изобразите ПВД движения электронов в триоде.
- 1.4. Чем триоды СВЧ принципиально отличаются от обычных низкочастотных ламп?
- 1.5. Почему в изучаемой конструкции усилителя используются коаксиальные резонаторы вместо LC-контуров?
- 1.6. Чем объяснить преимущественное использование схемы с ОС в усилителях на металлокерамических лампах?
- 1.7. Почему при частотной перестройке достаточно изменять объем только выходного резонатора?
- 1.8. Какие элементы конструкции усилителя определяют ширину его полосы рабочих частот?
- 1.9. Объясните принцип возбуждения входного резонатора и отвода энергии из выходного.
- 1.10. Коаксиальные резонаторы имеют резонансную длину, равную половине длины волны. Почему в исследуемой конструкции используются более короткие резонаторы?
- 1.11. Чем объяснить малую добротность входного резонатора?
- 1.12. Какие причины препятствуют утечке СВЧ энергии через цепи питания лампы?
- 1.13. Почему наблюдается зависимость тока анода от входной мощности?
- 1.14. Почему наблюдается зависимость коэффициента усиления от входной мощности?
- 1.15. Укажите области применения триодов и тетродов СВЧ.

### **2. ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ И ПРОЛЕТНЫЕ КЛИСТРОНЫ**

- 2.1. Нарисуйте принципиальную схему отражательного клистрона и объясните принцип действия этого прибора.
- 2.2. Вокруг каких электронов происходит группирование электронного потока в сгусток (объясните с помощью пространственно-временной диаграммы).



- 2.3. Что называется зоной генерации? Нарисуйте и объясните картину зон генерации в отражательном клистроне.
- 2.4. Что такое конвекционный ток? Чем он отличается в начале и в конце дрейфа электронов.
- 2.5. Объясните зависимость мощности колебаний от напряжения отражателя.
- 2.6. Что такое электронная перестройка?
- 2.7. Можно ли осуществить электронную перестройку с помощью напряжения на резонаторе  $U_a$ ?
- 2.8. Теоретически существует бесконечное число зон генерации. Чем ограничивается число зон на практике?
- 2.9. Какие требования по мощности предъявляются к источникам  $U_0$  и  $U_{отр}$ ?
- 2.10. От чего зависит средняя частота клистрона? Как ее можно менять?
- 2.11. Каким образом можно регулировать выходную мощность клистрона?
- 2.12. Объясните все обозначения на схеме лабораторной установки.
- 2.13. Укажите возможные области применения отражательного клистрона.
- 2.14. Почему не находят применения клистроны на более низких частотах радиодиапазона?

### **3. ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ**

- 3.1. Объясните принцип действия и устройство ЛБВ-О.
- 3.2. В чем заключается условие синхронизма?
- 3.3. В чем заключается назначение ЗС? Объясните ее устройство. Какими параметрами она характеризуется.
- 3.4. Что такое пространственные гармоники? Чем они отличаются друг от друга?
- 3.5. Какими параметрами определяется коэффициент усиления ЛБВ-О?
- 3.6. Чем объяснить широкополосный характер работы ЛБВ?
- 3.7. Что ограничивает полосу пропускания ЛБВ?
- 3.8. Объясните вид зависимости коэффициента усиления от напряжения на спирали?
- 3.9. Объясните вид зависимости коэффициента усиления от напряжения на управляющем электроде?
- 3.10. Чему равен КПД ЛБВ-О? Какие методы повышения КПД вы знаете?
- 3.11. Для чего используется поглотитель в ЗС?
- 3.12. Объясните вид зависимости коэффициента усиления от входной мощности?
- 3.13. Что можно сказать о фазовых характеристиках ЛБВ?
- 3.14. Укажите основные области применения ЛБВ-О?

### **Перечень вопросов итоговой аттестации по дисциплине «Основы физики СВЧ»**

1. Физические основы электроники СВЧ: особенности работы электронных устройств с кратковременным (частотный резонанс) и длительным (пространственный резонанс) взаимодействием электронного пучка и электромагнитного поля, скоростная модуляция. Фазировка.
2. Основные уравнения электроники – уравнения движения электронов (Лоренца), макроскопические уравнения Максвелла, плотности токов и зарядов.
3. Гармонический состав конвекционного тока электронов, группирующихся в пространстве дрейфа, для двухрезонаторного клистрона. Выходная мощность, электронный КПД. Типичные параметры и применение клистронов. Многорезонаторный и умножительный клистроны.
4. Отражательный клистрон – СВЧ генератор. Сущность явлений в отражательном клистроне (ОК). Движение электронов в ОК. Углы пролета, параметр группирования,

фаза группировки. Гармонический состав тока конвекции в ОК. Оценка выходной мощности и электронного КПД ОК.

5. Эквивалентная схема ОК – одноконтурного генератора. Закон сохранения энергии в форме комплексных проводимостей для ОК. Баланс активных и реактивных мощностей и его применение для нахождения амплитуды установившихся колебаний и электронного смещения частоты. Зоны генерации, электронная настройка и ее крутизна. Конструкции ОК и типичные применения.
6. Замедляющие системы типа «диафрагмированного волновода» и «гребенка». Вывод характеристического уравнения, коэффициента замедления и распределения полей в этих системах. Неоднородные структуры типа «встречные штыри».
7. Схематическое устройство генераторной ЛОВ. Амплитудные и фазовые условия самовозбуждения. Прямые и обратные гармоники. Цепь обратной связи. Возможности плавной широкополосной перестройки частоты генерации. Основные параметры ЛОВ и ее применение.
8. Линейная теория ЛБВ типа О. Основные предположения теории. Электронные волны – как результат сильной связи медленной синхронной волны и электронного пучка. Вывод самосогласованной системы уравнений для определения комплексного волнового числа и функции поперечного распределения тока конвекции пучка в электронной волне.
9. Усредненные поля и характеристическое уравнение. Физические параметры теории: эффективная площадь поперечного сечения электронного пучка, удельное сопротивление связи пучка и волны, коэффициент депрессии сил пространственного заряда, усредненные по двум сечениям электронного пучка нормальная и аномальная функции Грина, параметр усиления.
10. Свойства функций Грина и их влияние на величину коэффициента депрессии и его зависимость от продольного волнового числа. Волны пространственного заряда. Редуцированная плазменная частота. Причины пространственной депрессии.
11. Элементарная теория магнетрона. Дрейфовое приближение. Движение электронов в скрещенных статических электрическом и магнитных полях в плоском магнетроне. Учет влияния на движение электронов СВЧ поля синхронной медленной волны.
12. Фазировка в магнетронных приборах: траектория ведущих центров, образование электронных сгустков – язычков, механизмы фазовой фокусировки и энергетических превращений при идеальном синхронизме.
13. Двухрезонаторный пролетный клистрон. Общая характеристика явлений. Движение электронов в пространстве дрейфа пролетного клистрона. Параметры группирования. Динамический угол пролета, фаза группировки.
14. Коаксиальные магнетроны и ниготроны. Схемы устройства этих приборов и структура распределения в них электромагнитных полей. Платинотроны, ЛБВ и ЛОВ М-типа. Схема устройства амплитрона, карматрона и ЛОВ типа М и принципы работы. Технические параметры.
15. Лабораторные источники мощности СВЧ. Теория группирования электронов в приборах клистронного типа. Исходные положения. Взаимодействие электронов с СВЧ полем в зазоре тороидального резонатора. Мощность взаимодействия СВЧ поля с электронным потоком в зазоре. Ток конвекции. Баланс мощностей в стационарном режиме.
16. Физические принципы приборов СВЧ, основанных на длительном взаимодействии с группировкой электронов благодаря скоростной модуляции в нерезонансных замедляющих структурах. Схематическое устройство усилительной ЛБВ и ее технические параметры.
17. Медленные электромагнитные волны над поверхностью диэлектрика и металла с конечной проводимостью. Три типа волноведущих систем. Однородные и неоднородные замедляющие структуры. Прямые и обратные пространственные

гармоники. Групповая и фазовая скорости медленных волн. Нормальная и аномальная дисперсии.

18. Анализ решений характеристического уравнения в линейном приближении. Область параметров, зависящих от свойств замедляющей структуры и пучка, где существуют нарастающие электронные волны. Влияние величины пространственного заряда на структуру и свойства электронных волн. Механизм идеальной фазировки в ЛБВ.
19. Экспериментальные методы измерения усиления, эффективной поверхности и диаграммы направленности. Методы идентичных и эталонных антенн. Основные погрешности в антенных измерениях: отражения от окружающих тел, антенн и различие ближнего и дальнего поля. Измерения ближнего поля. Измерения по методу моделирования. Неотражающие антенны и помещения.
20. Измерение мощности СВЧ. Калориметрические методы. Тепловые методы измерения малых мощностей (боллометрические и термисторные мосты). Измерители проходящей мощности. Измерители импульсной мощности. Детекторы и синхронные детекторные схемы высокой чувствительности.
21. Физические основы приборов СВЧ, основанных на движении электронов в скрещенных электрическом и однородном магнитном полях. Многорезонаторный магнетрон. Виды траекторий электронов, синхронизм, образование сгустков, виды колебаний ( $\pi$ -вид), структура СВЧ поля в пространстве взаимодействия. Механизм передачи энергии электронов ВЧ полю. Частотный диапазон применения, уровень мощности, КПД, область применения. Методы борьбы с перескоками частоты.

Ответ на зачете оценивается по следующим критериям (максимально можно набрать 40 баллов):

Набрано баллов	Критерии
33-40 баллов	1) содержание материала билета раскрыто полностью; 2) материал изложен грамотно, в определенной логической последовательности, точно используется терминология; 3) показано умение иллюстрировать теоретические положения конкретными примерами, применять их в новой ситуации; 4) продемонстрировано усвоение ранее изученных сопутствующих вопросов; 5) ответ самостоятельный, без наводящих вопросов; 6) допущены одна–две неточности при освещении второстепенных вопросов, которые исправляются после замечаний или наводящих вопросов.
25-32 баллов	Ответ удовлетворяет в основном требованиям на оценку «отлично», но при этом имеет один из недостатков: 1) в изложении допущены небольшие пробелы, не исказившие сути содержания ответа; 2) допущены один–два недочета при освещении основного содержания ответа (выполнения практического задания), исправленные после замечания экзаменатора; 3) допущены ошибка или более двух недочетов при освещении второстепенных вопросов, которые исправляются после замечания экзаменатора.
16-24 баллов	1) неполно или непоследовательно раскрыто содержание материала, но продемонстрированы общее понимание вопроса и умения, достаточные для дальнейшего усвоения материала; 2) имелись затруднения или допущены ошибки в определении понятий, использовании терминологии, выполнении практических заданий, исправленные после нескольких наводящих вопросов;

	3) при неполном знании теоретического материала выявлена недостаточная сформированность компетенций, умений и навыков, студент не может применить теорию в новой ситуации
менее 16 баллов	1) не раскрыто основное содержание учебного материала; 2) обнаружено незнание или непонимание большей или наиболее важной части учебного материала; 3) допущены ошибки в определении понятий, при использовании терминологии, которые не исправлены после нескольких наводящих вопросов. 4) ответ на вопрос полностью отсутствует. 5) отказ от ответа.

Программа составлена в соответствии с требованиями ОС ВО РУДН.

Руководитель направления 03.03.02

Директор института физических исследований и технологий, д.ф.-м.н., профессор



О.Т. Лоза