

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"  
Институт физики



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной деятельности КФУ

Проф. Таюрский Д.А.

\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

*подписано электронно-цифровой подписью*

### Программа дисциплины

Электродинамика сверхвысоких частот Б1.В.ОД.4

Направление подготовки: 03.03.03 - Радиофизика

Профиль подготовки: Радиофизические методы по областям применения (Радиофизические измерения)

Квалификация выпускника: бакалавр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

**Автор(ы):**

Дуглав А.В.

**Рецензент(ы):**

Егоров А.В.

### **СОГЛАСОВАНО:**

Заведующий(ая) кафедрой: Тагиров М. С.

Протокол заседания кафедры No \_\_\_\_ от " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Учебно-методическая комиссия Института физики:

Протокол заседания УМК No \_\_\_\_ от " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Регистрационный No 654917

Казань  
2017

## Содержание

1. Цели освоения дисциплины
2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля
4. Структура и содержание дисциплины/ модуля
5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения
6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов
7. Литература
8. Интернет-ресурсы
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины/модуля согласно утвержденному учебному плану

Программу дисциплины разработал(а)(и) доцент, к.н. (доцент) Дуглав А.В. Кафедра квантовой электроники и радиоспектроскопии Отделение радиофизики и информационных систем, Alexander.Dooglav@kpfu.ru

### 1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины "Электродинамика СВЧ" являются:

- усвоение студентами отличия свойств электромагнитных волн с отличными от нуля продольными составляющими поля от чисто поперечных волн;
- изучение структуры полей, картины линий поверхностных токов основных типов волн в прямоугольном и круглом цилиндрическом волноводах;
- изучение структуры полей, картины линий поверхностных токов основных типов колебаний в прямоугольном и круглом цилиндрическом резонаторах;
- изучение факторов, определяющих потери в волноводах и добротность объемных резонаторов;
- изучение основных типов и свойств замедляющих систем СВЧ;
- изучение способов расчетов основных свойств волноводов, резонаторов в диапазоне сверхвысоких частот.
- изучение основных принципов работы активных приборов СВЧ: клистронного генератора и усилителя на основе лампы бегущей волны, а также современных полупроводниковых источников СВЧ.
- изучение основных принципов и методов измерения сопротивления нагрузки в диапазоне СВЧ, измерения параметров матрицы рассеяния четырехполюсников в диапазоне СВЧ, измерения параметров объемных резонаторов, измерения мощности в диапазоне СВЧ.

### 2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы высшего профессионального образования

Данная учебная дисциплина включена в раздел " Б1.В.ОД.4 Дисциплины (модули)" основной образовательной программы 03.03.03 Радиофизика и относится к обязательным дисциплинам. Осваивается на 4 курсе, 7 семестр.

Профессиональный цикл Б3. Необходимые "входные" знания: курс по электричеству и магнетизму (общая физика), по электродинамике (желательно). Освоение данной дисциплины необходимо для всех последующих курсов, в которых рассматриваются вопросы, связанные с измерениями на сверхвысоких частотах (ЭПР-спектроскопия, диэлектрические свойства, современные средства и способы радиосвязи).

### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля

В результате освоения дисциплины формируются следующие компетенции:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ОПК-1 (профессиональные компетенции)	способностью к овладению базовыми знаниями в области математики и естественных наук, их использованию в профессиональной деятельности (ОПК-1)
ПК-1 (профессиональные компетенции)	способностью понимать принципы работы и методы эксплуатации современной радиоэлектронной и оптической аппаратуры и оборудования (ПК-1)

В результате освоения дисциплины студент:

1. должен знать:

- Отличия свойств электромагнитных волн с отличными от нуля продольными составляющими поля от чисто поперечных волн;
- Структуру полей, картину линий поверхностных токов основных типов волн в прямоугольном и круглом цилиндрическом волноводах;
- Структуру полей, картину линий поверхностных токов основных типов колебаний в прямоугольном и круглом цилиндрическом резонаторах;
- Факторы, определяющие потери в волноводах и добротность объемных резонаторов;
- Основные типы и свойства замедляющих систем СВЧ;
- Основные принципы работы активных приборов СВЧ: клистронного генератора и усилителя на основе лампы бегущей волны, а также современных полупроводниковых источников СВЧ, уметь применять их на практике.
- Основные принципы и методы измерения сопротивления нагрузки в диапазоне СВЧ, измерения параметров матрицы рассеяния четырехполюсников в диапазоне СВЧ, измерения параметров объемных резонаторов, измерения мощности в диапазоне СВЧ, уметь применять их на практике.

2. должен уметь:

- Рассчитывать основные свойства волноводов, резонаторов в диапазоне сверхвысоких частот.

3. должен владеть:

основными методами и способами расчета основных свойств волноводов, резонаторов в диапазоне сверхвысоких частот.

4. должен демонстрировать способность и готовность:

углубленного самостоятельного изучения появляющихся технических новинок в области СВЧ-техники

#### **4. Структура и содержание дисциплины/ модуля**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных(ые) единиц(ы) 108 часа(ов).

Форма промежуточного контроля дисциплины зачет в 7 семестре.

Суммарно по дисциплине можно получить 100 баллов, из них текущая работа оценивается в 50 баллов, итоговая форма контроля - в 50 баллов. Минимальное количество для допуска к зачету 28 баллов.

86 баллов и более - "отлично" (отл.);

71-85 баллов - "хорошо" (хор.);

55-70 баллов - "удовлетворительно" (удов.);

54 балла и менее - "неудовлетворительно" (неуд.).

#### **4.1 Структура и содержание аудиторной работы по дисциплине/ модулю**

##### **Тематический план дисциплины/модуля**

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
1.	Тема 1. Уравнения электромагнитного поля. Плоская электромагнитная волна.	7	2	2	2	0	Устный опрос
2.	Тема 2. Электромагнитные волны в направляющих системах. Волны в прямоугольных волноводах.	7	4	2	1	0	Устный опрос
3.	Тема 3. Поверхностные токи в стенках волноводов.	7	6	2	1	0	Устный опрос
4.	Тема 4. Волны в круглом цилиндрическом волноводе.	7	8	2	1	0	Устный опрос
5.	Тема 5. Распространение электромагнитных волн в волноводах с потерями.	7	10	2	2	0	Устный опрос
6.	Тема 6. Характеристическое и эквивалентное сопротивление волновода.	7	12	2	1	0	Устный опрос
7.	Тема 7. Объемные резонаторы. Прямоугольный резонатор. Круглый цилиндрический резонатор.	7	14	2	1	0	Устный опрос
8.	Тема 8. Добротность объемного резонатора.	7	16	2	1	0	Устный опрос
9.	Тема 9. Волны в замедляющих системах.	7	18	2	0	0	Устный опрос
10.	Тема 10. Генераторы СВЧ. Отражательный клистрон.	7	1-18	0	0	4	Отчет
11.	Тема 11. Генератор на лампе бегущей волны.	7	1-18	0	0	2	Отчет
12.	Тема 12. Генератор на диоде Ганна.	7	1-18	0	0	4	Отчет

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
13.	Тема 13. Усилители СВЧ. Лампа бегущей волны типа О.	7	1-18	0	0	2	Отчет
14.	Тема 14. Измерения на СВЧ. Измерение полных сопротивлений в диапазоне СВЧ при помощи измерительной линии.	7	1-18	0	0	4	Отчет
15.	Тема 15. Измерение полных сопротивлений в диапазоне СВЧ при помощи поляризационного измерителя.	7	1-18	0	0	4	Отчет
16.	Тема 16. Измерение мощности в диапазоне СВЧ при помощи терморезисторного измерителя.	7	1-18	0	0	4	Отчет
17.	Тема 17. Измерение мощности в диапазоне СВЧ при помощи термоэлектрического измерителя	7	1-18	0	0	4	Отчет
18.	Тема 18. Измерение элементов матрицы рассеяния четырехполюсника в диапазоне СВЧ	7	1-18	0	0	4	Отчет
19.	Тема 19. Измерение нагруженной добротности объемных резонаторов	7	1-18	0	0	4	Отчет
	Тема . Итоговая форма контроля	7		0	0	0	Зачет
	Итого			18	10	36	

#### 4.2 Содержание дисциплины

##### Тема 1. Уравнения электромагнитного поля. Плоская электромагнитная волна.

###### *лекционное занятие (2 часа(ов)):*

Решение уравнений Максвелла для однородной, линейной, непроводящей, незаряженной среды для случая, когда поля зависят только от  $z$  и  $t$ .

###### *практическое занятие (2 часа(ов)):*

Определение толщины скин-слоя. Определение граничной частоты металл-диэлектрик.

##### Тема 2. Электромагнитные волны в направляющих системах. Волны в прямоугольных волноводах.

###### *лекционное занятие (2 часа(ов)):*

Электромагнитные волны в направляющих системах. Волны в прямоугольных волноводах. Н-волны в прямоугольных волноводах, вывод составляющих полей  $E$  и  $H$ . Волна  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе. Картина силовых линий поля  $H$  и  $E$ . Е-волны в прямоугольном волноводе, вывод составляющих полей  $E$  и  $H$ . Волна  $E_{11}$ . Картина силовых линий поля  $H$  и  $E$ .

**практическое занятие (1 часа(ов)):**

Решение уравнений Максвелла для продольных электромагнитных волн в декартовой системе координат.

**Тема 3. Поверхностные токи в стенках волноводов.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Вывод соотношения между поверхностной плотностью тока и напряженностью магнитного поля около стенки волновода. Линии поверхностного тока для основного типа волны в прямоугольном волноводе.

**практическое занятие (1 часа(ов)):**

Вычисление продольных и поперечных токов в стенках прямоугольного волновода для волны  $H_{10}$

**Тема 4. Волны в круглом цилиндрическом волноводе.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Волны в круглом цилиндрическом волноводе. Н-волны в прямоугольных волноводах, вывод составляющих полей  $E$  и  $H$ . Основной тип волны. Картина силовых линий. Волна  $E_{01}$  в круглом цилиндрическом волноводе. Картина силовых линий.

**практическое занятие (1 часа(ов)):**

Решение уравнений Максвелла для продольных электромагнитных волн в цилиндрической системе координат.

**Тема 5. Распространение электромагнитных волн в волноводах с потерями.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Распространение электромагнитных волн в волноводах с потерями. Вывод общей формулы коэффициент затухания. Коэффициент затухания для основного типа волны в прямоугольном волноводе.

**практическое занятие (2 часа(ов)):**

Расчет затухания в прямоугольных и круглых цилиндрических волноводах.

**Тема 6. Характеристическое и эквивалентное сопротивление волновода.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Характеристическое и эквивалентное сопротивление волновода. Согласование волноводов. Три способа определения эквивалентного сопротивления волновода.

**практическое занятие (1 часа(ов)):**

Расчет полей в волноводе с использованием понятия характеристического сопротивления.

**Тема 7. Объемные резонаторы. Прямоугольный резонатор. Круглый цилиндрический резонатор.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Объемные резонаторы. Способ определения структуры полей в резонаторе с использованием структуры поля в волноводе. Прямоугольный резонатор, колебания Н-типа и Е-типа. Круглый цилиндрический резонатор. Колебания типа  $H_{mnl}$ . Поле колебаний  $H_{011}$ . Колебания типа  $E_{mnl}$ . Поле колебаний  $E_{01m}$ . Вырожденные типы колебаний в цилиндрических резонаторах.

**практическое занятие (1 часа(ов)):**

Расчет резонансных частот круглых и прямоугольных резонаторов для различных типов колебаний.

**Тема 8. Добротность объемного резонатора.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Добротность объемного резонатора, общие определения Собственная, внешняя и нагруженная добротность. Расчет добротности прямоугольного резонатора с колебаниями типа  $H_{01n}$ .



**практическое занятие (1 часа(ов)):**

Расчет добротности резонаторов для различных типов колебаний.

**Тема 9. Волны в замедляющих системах.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Типы замедляющих систем. Волны в замедляющих системах. Коэффициент замедления. Пространственные гармоники поля замедленной волны.

**Тема 10. Генераторы СВЧ. Отражательный клистрон.**

**лабораторная работа (4 часа(ов)):**

Устройство и принцип работы отражательного клистрона ? маломощного генератора электромагнитных колебаний сверхвысокой частоты. Экспериментальная проверка основных соотношений, описывающих работу отражательного клистрона

**Тема 11. Генератор на лампе бегущей волны.**

**лабораторная работа (2 часа(ов)):**

Ознакомление с вопросами использования ламп бегущей волны (ЛБВ) в схемах автогенераторов, применяемых в ряде устройств измерительной техники. Исследование стабильности частоты генератора на ЛБВ с высокодобротным резонатором в канале обратной связи.

**Тема 12. Генератор на диоде Ганна.**

**лабораторная работа (4 часа(ов)):**

Знакомство с физическими принципами работы генератора на диоде Ганна, его конструкцией и основными характеристиками.

**Тема 13. Усилители СВЧ. Лампа бегущей волны типа О.**

**лабораторная работа (2 часа(ов)):**

Знакомство с устройством и принципами работы усилительной лампы бегущей волны (ЛБВ) типа О. Экспериментальное определение некоторых параметров ЛБВ, качественное объяснение полученных результатов.

**Тема 14. Измерения на СВЧ. Измерение полных сопротивлений в диапазоне СВЧ при помощи измерительной линии.**

**лабораторная работа (4 часа(ов)):**

Понятие полного сопротивления на примере диафрагм. Емкостные и индуктивные диафрагмы, резонансное окно. Связь полного сопротивления нагрузки с коэффициентом отражения. Устройство и принцип действия измерительной линии. Понятие условного конца линии.

**Тема 15. Измерение полных сопротивлений в диапазоне СВЧ при помощи поляризационного измерителя.**

**лабораторная работа (4 часа(ов)):**

Понятие полного сопротивления на примере диафрагм. Емкостные и индуктивные диафрагмы, резонансное окно. Связь полного сопротивления нагрузки с коэффициентом отражения. Устройство и принцип действия поляризационного измерителя. Калибровка измерения фазы коэффициента отражения.

**Тема 16. Измерение мощности в диапазоне СВЧ при помощи терморезисторного измерителя.**

**лабораторная работа (4 часа(ов)):**

Устройство и принцип действия термисторного измерителя. Режимы работы. Измеритель с автоматической балансировкой моста.

**Тема 17. Измерение мощности в диапазоне СВЧ при помощи термоэлектрического измерителя**

**лабораторная работа (4 часа(ов)):**

Устройство и принцип действия термоэлектрического измерителя. Назначение согласующего каскада. Блок-схема УПТ с преобразованием напряжения.



**Тема 18. Измерение элементов матрицы рассеяния четырехполюсника в диапазоне СВЧ****лабораторная работа (4 часа(ов)):**

Понятие о матрице рассеяния четырехполюсника. Методика измерения параметров матрицы рассеяния симметричных пассивных волноводных четырехполюсников трехсантиметрового диапазона.

**Тема 19. Измерение нагруженной добротности объемных резонаторов****лабораторная работа (4 часа(ов)):**

Знакомство с понятием ?добротность? в применении к объемному резонатору ? колебательной системе диапазона СВЧ, с различными методами измерения добротности объемных резонаторов. Измерение добротности объемных резонаторов методом резонансных характеристик.

**4.3 Структура и содержание самостоятельной работы дисциплины (модуля)**

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
1.	Тема 1. Уравнения электромагнитного поля. Плоская электромагнитная волна.	7	2	Проработка материала лекции	4	устный опрос
2.	Тема 2. Электромагнитные волны в направляющих системах. Волны в прямоугольных волноводах.	7	4	Проработка материала лекции и гл.3 книги Лебедева "Техника и приборы СВЧ"	2	устный опрос
3.	Тема 3. Поверхностные токи в стенках волноводов.	7	6	Проработка материала лекции и §3.6, §5.2 книги Лебедева "Техника и приборы СВЧ"	2	устный опрос
4.	Тема 4. Волны в круглом цилиндрическом волноводе.	7	8	Проработка материала лекции и гл.4 книги Лебедева "Техника и приборы СВЧ"	2	устный опрос
5.	Тема 5. Распространение электромагнитных волн в волноводах с потерями.	7	10	Проработка материала лекции и гл.5 книги Лебедева "Техника и приборы СВЧ"	4	устный опрос

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
6.	Тема 6. Характеристическое и эквивалентное сопротивление волновода.	7	12	Проработка материала лекции и §6.2 книги Лебедева "Техника и приборы СВЧ"	2	устный опрос
7.	Тема 7. Объемные резонаторы. Прямоугольный резонатор. Круглый цилиндрический резонатор.	7	14	Проработка материала лекции и гл.4 книги Милованова, Собенина "Техника сверхвысоких частот"	2	устный опрос
8.	Тема 8. Добротность объемного резонатора.	7	16	Проработка материала лекции и §4.6 книги Милованова, Собенина "Техника сверхвысоких частот"	2	устный опрос
9.	Тема 9. Волны в замедляющих системах.	7	18	Проработка материала лекции и гл.5 книги Милованова, Собенина "Техника сверхвысоких частот"	4	устный опрос
10.	Тема 10. Генераторы СВЧ. Отражательный клистрон.	7	1-18	подготовка к отчету	2	отчет
11.	Тема 11. Генератор на лампе бегущей волны.	7	1-18	подготовка к отчету	2	отчет
12.	Тема 12. Генератор на диоде Ганна.	7	1-18	подготовка к отчету	2	отчет
13.	Тема 13. Усилители СВЧ. Лампа бегущей волны типа О.	7	1-18	подготовка к отчету	2	отчет
14.	Тема 14. Измерения на СВЧ. Измерение полных сопротивлений в диапазоне СВЧ при помощи измерительной линии.	7	1-18	подготовка к отчету	2	отчет

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
15.	Тема 15. Измерение полных сопротивлений в диапазоне СВЧ при помощи поляризационного измерителя.	7	1-18	подготовка к отчету	2	отчет
16.	Тема 16. Измерение мощности в диапазоне СВЧ при помощи терморезисторного измерителя.	7	1-18	подготовка к отчету	2	отчет
17.	Тема 17. Измерение мощности в диапазоне СВЧ при помощи термоэлектрического измерителя	7	1-18	подготовка к отчету	2	отчет
18.	Тема 18. Измерение элементов матрицы рассеяния четырехполюсника в диапазоне СВЧ	7	1-18	подготовка к отчету	2	отчет
19.	Тема 19. Измерение нагруженной добротности объемных резонаторов	7	1-18	подготовка к отчету. Подготовка к зачету.	2	отчет
	Итого				44	

### 5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения

Качество обучения достигается за счет использования следующих форм учебной работы: лекции, самостоятельная работа студента, самостоятельная работа студента в лаборатории, консультации. При проведении лабораторных работ используется следующее методическое пособие:

1. А.В.Дуглав, М.С.Тагиров, Б.Г.Тарасов, В.Г.Степанов. Лабораторный практикум по курсу "Электродинамика СВЧ". Изд-во КГУ, Казань, 2013 г., 176 стр.

### 6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

#### Тема 1. Уравнения электромагнитного поля. Плоская электромагнитная волна.

устный опрос , примерные вопросы:

Как выглядит аргумент функции, которая представляет собой волну, распространяющуюся со скоростью  $v$  в положительном направлении оси  $z$ ? (ОПК-1)

#### Тема 2. Электромагнитные волны в направляющих системах. Волны в прямоугольных волноводах.

устный опрос , примерные вопросы:

Граничные условия для полей  $E$  и  $H$  на границе металл-вакуум. (ОПК-1)

### **Тема 3. Поверхностные токи в стенках волноводов.**

устный опрос , примерные вопросы:

Определение и единицы измерения поверхностной плотности тока. (ОПК-1)

### **Тема 4. Волны в круглом цилиндрическом волноводе.**

устный опрос , примерные вопросы:

Физический смысл индексов волны в цилиндрическом волноводе. (ОПК-1)

### **Тема 5. Распространение электромагнитных волн в волноводах с потерями.**

устный опрос , примерные вопросы:

Единицы измерения коэффициента затухания. (ОПК-1)

### **Тема 6. Характеристическое и эквивалентное сопротивление волновода.**

устный опрос , примерные вопросы:

В чем отличие характеристического и эквивалентного сопротивления волновода? Для какого волновода и какого типа волны вводится понятие эквивалентного сопротивления волновода? (ОПК-1)

### **Тема 7. Объемные резонаторы. Прямоугольный резонатор. Круглый цилиндрический резонатор.**

устный опрос , примерные вопросы:

Чем отличаются уравнения падающей и отраженной волны? (ОПК-1)

### **Тема 8. Добротность объемного резонатора.**

устный опрос , примерные вопросы:

Определение добротности. (ОПК-1)

### **Тема 9. Волны в замедляющих системах.**

устный опрос , примерные вопросы:

Какие типы замедляющих систем вам известны? (ОПК-1)

### **Тема 10. Генераторы СВЧ. Отражательный клистрон.**

отчет , примерные вопросы:

Резонаторы. Чем обусловлено применение тороидального резонатора в клистроне? Какие еще типы резонаторов могут применяться в клистроне? Чем обусловлены потери в резонаторе клистрона? Векторные диаграммы напряжений и токов в двухполюснике. Объяснение зависимости частоты генерации клистрона от напряжения на отражателе при помощи векторных диаграмм. Зависит ли частота генерации от напряжения на резонаторе? Почему частоту регулируют напряжением на отражателе, а не на резонаторе? Чем определяется глубина модуляции скорости электрона в клистроне? Что выгоднее: увеличивать глубину модуляции изменением постоянного напряжения на отражателе и резонаторе или уменьшением расстояния между сетками резонатора? Почему? (ОПК-1, ПК-1)

### **Тема 11. Генератор на лампе бегущей волны.**

отчет , примерные вопросы:

Пространственные гармоники, отличие от частотных гармоник. Прямые и обратные пространственные гармоники - что это такое? Замедляющие системы: назначение, типы, коэффициент замедления. Назначение магнитного поля в ЛБВ типа О и М. Траектория движения электрона в магнитном поле. Почему ЛБВ может самовозбудиться? Какие условия должны быть выполнены для этого? (ОПК-1, ПК-1)

### **Тема 12. Генератор на диоде Ганна.**

отчет , примерные вопросы:

Почему на вольт-амперной характеристике диода Ганна имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением? Какими физическими свойствами носителей тока в арсениде галлия это обусловлено? Какие существуют режимы работы генератора на диоде Ганна? (ОПК-1, ПК-1)

### **Тема 13. Усилители СВЧ. Лампа бегущей волны типа О.**

отчет , примерные вопросы:

Пространственные гармоники, отличие от частотных гармоник. Прямые и обратные пространственные гармоники ? что это такое? Замедляющие системы: назначение, типы, коэффициент замедления. Назначение магнитного поля в ЛБВ типа О и М. Траектория движения электрона в магнитном поле. Почему ЛБВ может самовозбудиться? Какие условия должны быть выполнены для этого? Как предотвращается самовозбуждение в ЛБВ? При каких упрощающих предположениях строится линейная теория ЛБВ? Как зависит коэффициент усиления ЛБВ от длины замедляющей системы и от амплитуды входного сигнала? Что такое ?начальные потери? в ЛБВ? Чем объясняется их наличие в ЛБВ? (ОПК-1, ПК-1)

#### **Тема 14. Измерения на СВЧ. Измерение полных сопротивлений в диапазоне СВЧ при помощи измерительной линии.**

отчет , примерные вопросы:

Физический смысл настройки измерительной линии. Почему и к каким ошибкам могут привести неточная настройка контура зонда и контура детектора? Как определяется КСВ линии в случае линейного и квадратичного детектирования сигнала? Что такое ?условный конец линии?, методика его определения. Зачем нужно знать положение условного конца линии? Зачем после диафрагмы, сопротивление которой измеряется, включается согласованная волноводная нагрузка? Что можно (в принципе) включить вместо согласованной нагрузки? (ОПК-1, ПК-1)

#### **Тема 15. Измерение полных сопротивлений в диапазоне СВЧ при помощи поляризационного измерителя.**

отчет , примерные вопросы:

Почему максимум и минимум отсчета сигнала вращающейся детекторной секции определяют КСВ в основном волноводе? Какой будет зависимость сигнала от угла поворота детекторной секции (в случае линейного и квадратичного детектирования) при наличии чисто стоячей волны в основном волноводе и почему? Зачем после диафрагмы, сопротивление которой измеряется, включается согласованная волноводная нагрузка? Что можно (в принципе) включить вместо согласованной нагрузки? (ОПК-1, ПК-1)

#### **Тема 16. Измерение мощности в диапазоне СВЧ при помощи терморезисторного измерителя.**

отчет , примерные вопросы:

В чем суть метода замещения? Почему изменением внешнего тока можно сбалансировать мост терморезисторного измерителя мощности? Какой мост называется сбалансированным? Можно ли в измерителе мощности использовать терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС)? (ОПК-1, ПК-1)

#### **Тема 17. Измерение мощности в диапазоне СВЧ при помощи термоэлектрического измерителя**

отчет , примерные вопросы:

Чем отличается согласование генератора с волноводом (линией) от согласования термоэлектрического датчика с входом УПТ? Какие преимущества дает использование П-образного волновода? С какой целью в измерителе используется УПТ с преобразованием типа ?модулятор-демодулятор?? Можно ли в данном случае использовать УПТ без преобразования? (ОПК-1, ПК-1)

#### **Тема 18. Измерение элементов матрицы рассеяния четырехполюсника в диапазоне СВЧ**

отчет , примерные вопросы:

Дать определение матрицы рассеяния. Что такое плоскость отсчета при измерении коэффициента отражения? Связь между коэффициентом отражения и КСВ. Как определяется КСВ при квадратичном детектировании? (ОПК-1, ПК-1)

#### **Тема 19. Измерение нагруженной добротности объемных резонаторов**

отчет , примерные вопросы:

Чем определяется собственная добротность резонатора? Что такое критический режим работы резонатора? Структура электромагнитного поля колебаний типа  $H_{10m}$  в прямоугольном резонаторе,  $H_{11m}$  и  $H_{01m}$  в цилиндрическом резонаторе. (ОПК-1, ПК-1)

#### **Тема . Итоговая форма контроля**

### Примерные вопросы к зачету:

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля: текущий контроль успеваемости в форме письменных контрольных заданий, текущий контроль успеваемости в форме устного опроса по каждой лабораторной работе и итоговый контроль в форме зачета. Зачет проводится в соответствии с приведенной выше программой; контрольные работы формируются на основе следующей литературы:

1. А.В.Дуглав, Б.Г.Тарасов. Задачи и упражнения по курсу "Электродинамика СВЧ". Изд-во КГУ, Казань, 2000, 26 стр.

### Вопросы к зачету

1. Уравнения электромагнитного поля. Плоская электромагнитная волна.
2. Электромагнитные волны в направляющих системах. Граничные условия для полей  $E$  и  $H$  на стенках волновода.
3. Волны в прямоугольных волноводах. Уравнения для продольных составляющих поля  $E$  и  $H$ . Волна типа  $H$  в волноводе. Волна типа  $E$  в волноводе. Критическая длина волны. Основной тип волны в волноводе. Диаграмма возбуждения волновода. Режим отсечки, одноволновый режим.
4. Волны типа  $H_{mn}$  в прямоугольных волноводах. Физический смысл индексов. Возможные значения индексов. Составляющие поля  $H$  и  $E$ . Критическая длина волны.
5. Основной тип волны (определение). Основной тип волны в прямоугольном волноводе. Силовые линии полей  $E$  и  $H$ .
6. Волны типа  $E_{mn}$  в прямоугольных волноводах. Физический смысл индексов. Возможные значения индексов. Составляющие поля  $H$  и  $E$ . Критическая длина волны.
7. Волна  $E_{11}$  в прямоугольном волноводе. Силовые линии полей  $E$  и  $H$ .
8. Поверхностные токи в стенках волновода (волна  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе). Принцип, согласно которому можно нарушать целостность стенок волновода, не влияя на распространение волны по волноводу.
9. Волны  $H_{mn}$  в круглом цилиндрическом волноводе. Физический смысл индексов. Возможные значения индексов. Критическая длина волны.
10. Основной тип волны (определение). Основной тип волны в круглом цилиндрическом волноводе. Силовые линии полей  $E$  и  $H$ .
11. Волна типа  $H_{01}$  в круглом цилиндрическом волноводе. Силовые линии полей  $E$  и  $H$ .
12. Волны  $E_{mn}$  в круглом цилиндрическом волноводе. Физический смысл индексов. Возможные значения индексов. Критическая длина волны.
13. Волна типа  $E_{01}$  в круглом цилиндрическом волноводе. Силовые линии полей  $E$  и  $H$ .
14. Распространение волн в волноводах с потерями. Коэффициент затухания. Поверхностное сопротивление (определение). Поверхностная плотность тока в стенках волновода (определение, единицы измерения).
15. Характеристическое сопротивление волновода, связь с  $E$  и  $H$ . Эквивалентное сопротивление волновода.
16. Основной тип колебаний в резонаторе (определение). Колебания типа  $H_{mnl}$  в прямоугольном резонаторе. Какие значения могут принимать индексы  $m$ ,  $n$  и  $l$ ? Физический смысл индексов.
17. Колебания типа  $H_{101}$  в прямоугольном резонаторе. Силовые линии полей  $E$  и  $H$ .
18. Колебания типа  $E_{mnl}$  в прямоугольном резонаторе. Какие значения могут принимать индексы  $m$ ,  $n$  и  $l$ ? Физический смысл индексов.
19. Колебания типа  $E_{110}$  в прямоугольном резонаторе. Силовые линии полей  $E$  и  $H$ .
20. Колебания типа  $H_{mnl}$  в круглом цилиндрическом резонаторе. Какие значения могут принимать индексы  $m$ ,  $n$  и  $l$ ? Физический смысл индексов.
21. Колебания типа  $H_{011}$  в круглом цилиндрическом резонаторе. Силовые линии полей  $E$  и  $H$ .



22. Колебания типа  $E_{mnl}$  в круглом цилиндрическом резонаторе. Какие значения могут принимать индексы  $m$ ,  $n$  и  $l$ ? Физический смысл индексов.
23. Колебания типа  $E_{010}$  в круглом цилиндрическом резонаторе. Силовые линии полей  $E$  и  $H$ .
24. Собственная, внешняя (радиационная), нагруженная добротность объемного резонатора (определение). Коэффициент связи резонатора с волноводом (определение). Критическая связь.
25. Собственная добротность прямоугольного резонатора для колебаний  $H_{101}$  и  $H_{102}$ .
26. Вырожденные типы колебаний в круглых цилиндрических резонаторах.

### 7.1. Основная литература:

1. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.К. Синицын. - М.: НИЦ Инфра-М; Мн.: Нов. знание, 2013. - 424 с.: ил.; 60x90 1/16. - (Высшее образование: Бакалавриат). (п) ISBN 978-5-16-006211-2, 500 экз.  
<http://znanium.com/bookread.php?book=367972>
2. Григорьев А.Д. Электродинамика и микроволновая техника: Учебник. СПб., изд. Лань, 2007 - 704с. ISBN 978-5-8114-0706-4. <http://e.lanbook.com/view/book/118/page1/>
3. Муромцев Д.Ю., Зырянов Ю.Т., Федюнин П.А., Белоусов О.А., Рябов А.В., Головченко Е.В. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. - СПб.: Изд-во "Лань", 2014. - 448 с. ISBN 978-5-8114-1637-0. <http://e.lanbook.com/view/book/50680/page1/>
4. Электродинамика: Учебное пособие / И.Ф. Будагян, В.Ф. Дубровин, А.С. Сигов. - М.: Альфа-М: НИЦ ИНФРА-М, 2013. - 304 с.: ил.; 60x90 1/16. - (Магистратура). (переплет) ISBN 978-5-98281-329-9, 1000 экз. <http://znanium.com/bookread.php?book=391337>
5. Физика. Основы электродинамики. Электромагнитные колебания и волны: Учебное пособие / С.И. Кузнецов. - 4-е изд., испр. и доп. - М.: Вузовский учебник: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 231 с.: 60x90 1/16. (переплет) ISBN 978-5-9558-0332-6, 500 экз.  
<http://znanium.com/bookread.php?book=424601>

### 7.2. Дополнительная литература:

1. И. В. Лебедев. Техника и приборы СВЧ. т.1, Техника сверхвысоких частот. Высшая школа, М., 1970.
2. Бердышев, В. П. Радиолокационные системы [Электронный ресурс] : учебник / В. П. Бердышев, Е. Н. Гарин, А. Н. Фомин [и др.]; под общ. ред. В. П. Бердышева. - Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. - 400 с. - ISBN 978-5-7638 2479-7.  
<http://www.znanium.com/bookread.php?book=442536>

### 7.3. Интернет-ресурсы:

- Википедия - <http://ru.wikipedia.org>  
Все для студента - <http://www.twirpx.com/>  
Научная библиотека им. Н.И.Лобачевского - [http://www.kpfu.ru/main\\_page?p\\_sub=5056](http://www.kpfu.ru/main_page?p_sub=5056)  
Электронно-библиотечная система - <http://ibooks.ru>  
Электронные книги - <http://eknigi.org/>

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины(модуля)

Освоение дисциплины "Электродинамика сверхвысоких частот" предполагает использование следующего материально-технического обеспечения:



Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе "ZNANIUM.COM", доступ к которой предоставлен студентам. ЭБС "ZNANIUM.COM" содержит произведения крупнейших российских учёных, руководителей государственных органов, преподавателей ведущих вузов страны, высококвалифицированных специалистов в различных сферах бизнеса. Фонд библиотеки сформирован с учетом всех изменений образовательных стандартов и включает учебники, учебные пособия, УМК, монографии, авторефераты, диссертации, энциклопедии, словари и справочники, законодательно-нормативные документы, специальные периодические издания и издания, выпускаемые издательствами вузов. В настоящее время ЭБС ZNANIUM.COM соответствует всем требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) нового поколения.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе Издательства "Лань", доступ к которой предоставлен студентам. ЭБС Издательства "Лань" включает в себя электронные версии книг издательства "Лань" и других ведущих издательств учебной литературы, а также электронные версии периодических изданий по естественным, техническим и гуманитарным наукам. ЭБС Издательства "Лань" обеспечивает доступ к научной, учебной литературе и научным периодическим изданиям по максимальному количеству профильных направлений с соблюдением всех авторских и смежных прав.

Учебные аудитории для проведения лекционных, лабораторных и практических занятий, методические пособия, Интернет

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО и учебным планом по направлению 03.03.03 "Радиофизика" и профилю подготовки Радиофизические методы по областям применения (Радиофизические измерения).

Автор(ы):

Дуглав А.В. \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Рецензент(ы):

Егоров А.В. \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.