

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Радиофизический факультет

(факультет / институт / филиал)

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

Рабочая программа дисциплины

Вакуумная электроника

(наименование дисциплины)

Уровень высшего образования

бакалавриат

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки

02.03.02 Фундаментальная информатика и информационные технологии

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

Информационные системы и технологии

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

бакалавр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород
2023 год

1. Место и цели дисциплины (модуля) в структуре ОПОП

Дисциплина «Вакуумная электроника» относится к обязательным дисциплинам вариативной части (блок Б1.В.13) основной профессиональной образовательной программы (ОПОП) высшего образования по направлению подготовки 02.03.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии» на радиофизическом факультете ННГУ. Дисциплина обязательна для освоения в 6-м семестре.

Целями освоения дисциплины являются:

- сформировать у студентов современное представление об основных методах формирования активной среды в виде электронного пучка для мощных источников когерентного электромагнитного излучения, включая теорию эмиссии электронов из твердого тела.
- рассмотрение современных методов электронной оптики слаботочных систем, включая различные виды электронных микроскопов.

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

Формируемые компетенции Код компетенции (код компетенции, этап формирования)	Планируемые результаты обучения по дисциплине, характеризующие этапы формирования компетенций
<i>ПК-1.</i> Способность собирать, обрабатывать и интерпретировать данные современных научных исследований, необходимые для формирования подходов, решений и выводов по соответствующим научным и профессиональным проблемам. Этап формирования базовый	<i>З1 (ПК-1) Знать</i> уравнения движения в электромагнитном поле в общем случае и в случае однородных электрического и магнитного полей. <i>У1 (ПК-1) Уметь</i> приобретать новые знания в области физической электроники, используя современные образовательные и информационные технологии <i>У2 (ПК-1) Уметь</i> применять базовые знания в области математики для решения стандартных задач физической электроники. <i>В1 (ПК-1) Владеть</i> навыком анализа режимов температурного ограничения эмиссии и ограничения тока пространственным зарядом в электронных диодах. <i>В2 (ПК-1) Владеть</i> навыком классификации электромагнитных линз.

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 зачетных единицы, всего 72 часа, из которых 49 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (32 часа занятия лекционного типа, 16 часов занятия лабораторного типа), в том числе 1 час – мероприятия текущего контроля успеваемости, 23 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

Содержание дисциплины (модуля)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего часов			В том числе														
				Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы												Самостоятельная работа обучающегося, часы		
				из них														
	Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная
Очная					Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная
1. Введение	4			2						1			3			1		
2. Движение электронов в электрическом и магнитном статических полях	4			2						1			3			1		
3. Электронно-оптические свойства полей с аксиальной симметрией. Электронные линзы	4			2						1			3			1		
4. Электронно-оптические системы	4			2						1			3			1		
5. Интенсивные электронные пучки	4			2						1			3			1		
6. Общие вопросы эмиссионной электроники	4			2						1			3			1		
7. Термоэлектронная эмиссия	4			2						1			3			1		
8. Полевая эмиссия	4			2						1			3			1		
9. Вторичная электронная эмиссия	4			2						1			3			1		
10. Фотоэлектронная эмиссия	4			2						1			3			1		
11. Технические применения фото- и вторичной эмиссии	4			2						1			3			1		
12. Основные понятия электроники СВЧ	4			2						1			3			1		
13. Клитроны	5			2						1			3			2		
14. Лампы бегущей и обратной волны типа О (ЛБВ-О, ЛОВ-О)	5			2						1			3			2		
15. ЛБВ М-типа. Магнетрон	4			1						1			2			2		
16. Релятивистская высокочастотная электроника.	3			1						1			2			1		
17. Лазеры и мазеры на свободных электронах	3			1						1			2			1		
18. Вакуумная микроэлектроника СВЧ	5			1						1			2			3		

В т.ч. текущий контроль									1							
Промежуточная аттестация: зачет																

4. Образовательные технологии

В соответствии с рабочей программой и тематическим планом изучение дисциплины проходит в виде аудиторной и самостоятельной работы студентов. Учебный процесс в аудитории осуществляется в форме лекционных занятий.

Образовательные технологии, способствующие формированию компетенций используемые на занятиях лекционного типа:

- лекции с проблемным изложением учебного материала.
- регламентированная самостоятельная деятельность студентов;
- решение проблемных ситуаций для реализации технологии коллективной мыслительной деятельности.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

5.1 Вопросы, которые должны быть проработаны в ходе самостоятельной работы

1. Движение в слабонеоднородных полях (дрейфовая теория). Поперечный адиабатический инвариант. Дрейфовые уравнения. Уравнения Лагранжа. Теорема Буша.
2. Вариационные принципы динамики заряженных частиц. Электронно-оптический коэффициент преломления.
3. Классификация магнитных линз. Электронно-оптические свойства короткой (слабой) и длинной магнитных линз. Сильные магнитные линзы. Аберрации электронных линз. Электронные зеркала. Квадрупольные линзы. Отклоняющие системы.
4. Прожекторы электронно-лучевых трубок. Электронно-лучевые технологические установки. Электронные микроскопы (эмиссионный, просвечивающий, отражательный, растровый, автоэлектронный и автоионный, проекционные микроскопы). Разрешающая сила электронных микроскопов просвечивающего типа.
5. Предельный ток транспортировки электронного пучка в пространстве дрейфа. Формирование ленточных электронных пучков. Пушки Пирса.
6. Особенности работы электронных ламп на СВЧ. Инерция электронов. Наведенные токи в цепях электродов. Теорема о полном токе. Теорема Шокли - Рамо.
7. Скоростная модуляция электронного потока. Уравнение скоростной модуляции.
8. Принцип работы многорезонаторного клистрона.
9. Электронная проводимость клистрона. Стартовый ток и перестройка частоты клистрона.
10. Свойства периодических замедляющих систем. Пространственные гармоники. Фазовая скорость пространственной гармоники.
11. Нелинейная теория ЛБВ. Модель электронного потока в электронных приборах СВЧ. Метод крупных частиц. Дебаевский радиус электронного пучка.
12. Лампа обратной волны. Принцип действия. Дисперсионная характеристика замедляющей системы. Распределение поля и тока, электронная перестройка частоты.
13. Статический режим работы магнетрона. Электронное облако в негенерирующем магнетроне. Колебательные системы магнетронов. Виды колебаний колебательной системы магнетрона, π -вид колебаний. Группировка электронов и КПД магнетрона.
14. Классические электроны-осцилляторы и электронные мазеры. Принцип работы МЦР. Оценки оптимальных параметров. Устройство и работа гиротрона.
15. Релятивистские электронные мазеры - МЦАР и убитрон.

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы – основная и дополнительная литература.

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

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования.

ПК-1 Способность собирать, обрабатывать и интерпретировать данные современных научных исследований, необходимые для формирования подходов, решений и выводов по соответствующим научным и профессиональным проблемам.

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
Знания <i>Знать</i> уравнения движения в электромагнитном поле в общем случае и в случае однородных электрического и магнитного полей	Отсутствие знаний материала	Наличие грубых ошибок в основном материале	Знание основного материала с рядом негрубых ошибок	Знание основного материала с рядом заметных погрешностей	Знание основного материала с незначительными погрешностями	Знание основного материала без ошибок и погрешностей	Знание основного и дополнительного материала без ошибок и погрешностей
Умения <i>Уметь</i> 1. приобретать новые знания в области физической электроники, используя современные образовательные и информационные технологии 2. применять базовые знания в области математики для решения стандартных задач физической электроники.	Отсутствие способности решения стандартных задач	Наличие грубых ошибок при решении стандартных задач	Способность решения основных стандартных задач с существенными ошибками	Способность решения всех стандартных задач с незначительными погрешностями	Способность решения всех стандартных задач без ошибок и погрешностей	Способность решения стандартных и некоторых нестандартных задач	Способность решения стандартных и широкого круга нестандартных задач
Навыки <i>Владеть</i> 1. навыком анализа режимов температурного ограничения эмиссии и ограничения тока пространственным зарядом в электронных диодах. 2. навыком классификации электромагнитных линз.	Полное отсутствие навыка	Отсутствие навыка	Владение навыком в минимальном объеме	Посредственное владение навыком	Достаточное владение навыком	Хорошее владение навыком	Всестороннее владение навыком
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

заданий							
---------	--	--	--	--	--	--	--

6.2. Описание шкал оценивания.

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде зачета с оценкой в 6-м семестре, на которых определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала
- способности студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Зачет проводится в устной форме и заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ. Практическая часть предусматривает решение задачи.

Критерии оценок.

Оценка	Уровень подготовки
Превосходно	<p>Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом, студент демонстрирует творческий подход к решению нестандартных ситуаций. Студент дал полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета, подтверждая теоретический материал практическими примерами.</p> <p>100 %--ное выполнение контрольных заданий</p>
Отлично	<p>Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Студент дал полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета, подтверждает теоретический материал практическими примерами.</p> <p>Выполнение контрольных заданий на 90% и выше</p>
Очень хорошо	<p>Хорошая подготовка. Студент дает ответ на все теоретические вопросы билета при наличии неточностей.</p> <p>Студент активно работал на практических занятиях.</p> <p>Выполнение контрольных заданий от 80 до 90%.</p>
Хорошо	<p>В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Студент дает полный ответ на все теоретические вопросы билета при наличии неточностей. Допускаются ошибки при ответах на дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора.</p> <p>Выполнение контрольных заданий от 70 до 80%.</p>
Удовлетворительно	<p>Минимально достаточный уровень подготовки. Студент показывает минимальный уровень теоретических знаний, делает существенные ошибки, но при ответах на наводящие вопросы, может правильно сориентироваться и в общих чертах дать правильный ответ.</p> <p>Выполнение контрольных заданий от 50 до 70%.</p>
Неудовлетворительно	<p>Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Студент дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора.</p> <p>Выполнение контрольных заданий до 50%.</p>
Плохо	<p>Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы.</p> <p>Выполнение контрольных заданий менее 20 %.</p>

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- устные и письменные ответы на вопросы.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и навыков используются следующие процедуры и технологии:

- практические контрольные задания, включающие одну или несколько задач

Для проведения итогового контроля сформированности компетенции используются: устный опрос, решение практических задач.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

Вопросы на зачет для оценки сформированности компетенции ПК-1

1. Интеграл энергии при релятивистских скоростях электронов. Виды электронных траекторий при движении в статических однородных электрическом и магнитном полях.
2. Преставление радиус-вектора и скорости электрона при движении в слабо неоднородных полях. Условия сохранения поперечного адиабатического инварианта. Теорема Буша. Устройство и принцип работы магнетронно-инжекторной пушки гиротрона.
3. Вариационные принципы динамики заряженных частиц (принцип Гамильтона, укороченного действия, Мопертюи). Электронно-оптический коэффициент преломления.
4. Классификация электростатических линз. Построение изображения в тонкой и толстой линзах.
5. Классификация магнитных линз. Понятие о квадрупольных линзах и электронных зеркалах. Виды aberrаций электронных линз.
6. Виды электронных микроскопов (эмиссионный, просвечивающий, отражательный, растровый, автоэлектронный, автоионный), принцип их действия.
7. Принцип работы системы рекуперации энергии электронов в мощных электронных приборах.
8. Отличия режимов температурного ограничения эмиссии и ограничения тока пространственным зарядом в электронных диодах. Закон “трех вторых” для плоского диода.
9. Пушки Пирса. Предельный ток транспортировки электронного пучка в пространстве дрейфа.
10. Силы, действующие на электрон при выходе из твердого тела. Профиль потенциального барьера на границе твердого тела.
11. Теория термоэлектронной эмиссии из твердого тела. Механизмы действия пленочного и оксидного катодов.
12. Изменение профиля потенциального барьера на границе твердого тела под действием внешнего электрического поля. Эффект Шоттки. Автоэлектронная и взрывная эмиссия.
13. Зависимость коэффициента вторичной эмиссии от энергии и угла падения первичных электронов. Распределение вторичных электронов по энергиям.
14. Основные законы внешнего фотоэффекта (законы Столетова и Эйнштейна). Типы фотокатодов и их сравнительные характеристики.
15. Принцип работы и быстродействие фотоэлементов с внешним фотоэффектом. Фотоумножители.
16. Понятие о наведенном токе в цепях электродов. Теорема о полном токе. Теорема Шокли - Рамо. Метод полного тока. Проводимость диода на СВЧ.
17. Статическое и динамическое управление электронным потоком. Скоростная модуляция электронного потока. Уравнение скоростной модуляции.
18. Устройство и принцип действия двухрезонаторного пролетного клистрона. Пространственно-временная диаграмма. Принцип работы многорезонаторного клистрона.
19. Отражательный клистрон. Устройство, пространственно-временная диаграмма.
20. Зоны генерации, стартовый ток и перестройка частоты отражательного клистрона.
21. Принцип действия ЛБВ-О. Свойства периодических замедляющих систем ЛБВ-О. Пространственные гармоники. Устройство ЛБВ.
22. Дисперсионное уравнение ЛБВ. Параметры дисперсионного уравнения. Свойства корней дисперсионного уравнения. Коэффициент усиления ЛБВ.
23. Нелинейные эффекты при группировке в ЛБВ. Зависимость коэффициента полезного действия ЛБВ от параметров дисперсионного уравнения. Способы увеличения КПД ЛБВ-О.
24. Принцип действия лампы обратной волны. Дисперсионная характеристика замедляющей системы. Распределение поля и тока, электронная перестройка частоты.
25. Принцип действия, устройство и группировка электронов в ЛБВ-М.
26. Статический режим работы магнетрона. Электронное облако в негенерирующем магнетроне. Колебательные системы магнетронов, π -вид колебаний. Группировка электронов и КПД магнетрона.

27. Принцип работы МЦР. Оценки оптимальных параметров.
28. Причины увеличения ускоряющего напряжения в электронных приборах СВЧ. ЭОС релятивистских приборов. Релятивистская ЛБВ, МЦАР и убитрон.
29. Конструкция и параметры решетки автоэмиссионных катодов на основе катодов Спиндта. Диод и триод с катодом Спиндта. Особенности устройства и работы ЛБВ **О** и **М** типов с катодами Спиндта.

Типовые задачи для оценивания сформированности умений и навыков по компетенции ПК-1

1. Найти предельную частоту (длину волны) для плоского диода при которой можно пренебречь инерцией электронов. Рассмотреть 2 случая : а) диод работает в режиме ограничения тока пространственным зарядом; б) влиянием пространственного заряда можно пренебречь. Ускоряющее напряжение $U=300$ В, зазор анод-катод $d=5$ мм.
2. Найти заряд, прошедший во внешней цепи плоского диода при пролете единичного электрона.
3. Найти частоту генерации монотрона с $d=20$ мм, $U=400$ В.
4. Пользуясь методом полного тока найти время пролета электрона в диоде в режиме ограничения тока пространственным зарядом.
5. Доказать, что в монотроне активная и реактивная проводимости электронного пучка $Y_a(0)=Y_r(0)=0$.
6. При какой частоте f в клистроне после прохождения первого резонатора отсутствует модуляция электронного пучка по скорости ? Ускоряющее напряжение $U_0=300$ В, зазор между сетками модулятора $d=5$ мм.
7. Найти частоту f , при которой коэффициент взаимодействия электронов с полем резонатора в клистроне $M=0.9$, если $d=5$ мм, $U_0=400$ В.
8. На каком расстоянии x от 1-го резонатора в 2-резонаторном клистроне образуется наиболее плотный электронный сгусток, если $\lambda=4$ см, $U_0=4$ кВ, $d=2$ мм, $U_{1M}=150$ В.
9. На каком расстоянии x от 1-го резонатора в 2-резонаторном клистроне надо поставить второй резонатор, чтобы получить максимальный КПД на второй гармонике рабочей частоты, если $\lambda=8$ см, $U_0=4$ кВ, $d=6$ мм, $U_{1M}=100$ В.
10. Найти связь между номером зоны генерации n и потенциалом $U_{отр}$ отражателя в отражательном клистроне.
11. Найти величину параметра группировки и номер зоны генерации для отражательного клистрона при следующих параметрах: $U_0=300$ В, $U_{отр}=50$ В, $f=500$ МГц, $D=5$ мм, $U_{1M}=40$ В, $d=2$ мм.
12. Оценить, на каком расстоянии x от замедляющей системы надо пропускать электронный пучок, если $\lambda=3$ см, $U_0=1$ кВ.
13. Найти коэффициент усиления G в ЛБВ-О, если длина лампы $L=10$ см, $\lambda=3$ см, $U_0=4$ кВ, $R_c=10$ ом, $I_0=10$ мА, считая, что влиянием поля пространственного заряда можно пренебречь, а скорость электронного пучка равна холодной фазовой скорости волны.
14. На сколько скорость электронного пучка должна превышать холодную фазовую скорость волны, чтобы в ЛБВ-О отсутствовала экспоненциально нарастающая волна ? $U_0=1$ кВ, $R_c=40$ ом, $I_0=100$ мА. Полем пространственного заряда пренебречь.
15. В ЛБВ-О отношение ускоряющих напряжений при работе на 1-ой и 3-ей пространственных гармониках $U_{01}/U_{03}=1.4$. Определить постоянную распространения нулевой гармоники α_0 , если период системы $D=4$ мм.
16. Найти величину фазовой скорости в ЛБВ-М на границах полосы усиления, если $\lambda=3$ см, $I_0=3$ мА, $R_c=50$ Ом, магнитное поле $B=100$ Гс, потенциалы отрицательного электрода и замедляющей системы относительно катода соответственно $U_1=-100$ В, $U_2=900$ В, а расстояние между ними $d=1$ см.
17. Найти фазовую скорость для -вида колебаний в 24-резонаторном магнетроне, если $\lambda=10$ см, $R_a=5$ см. Чему примерно равно замедление и анодное напряжение?

18. Оценить оптимальные параметры гиротрона, если $U_0=70$ кВ, $\lambda =2.14$ мм, $g=1$, длина резонатора $L=10$.

6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 г. №55-ОД,

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1992. 664 с.(122)
2. Жеребцов И.И. Электроника. Энергоатомиздат. М.: 1990.(21)
3. Электронные приборы. / Под ред. Г.Г. Шишкина. 4-е изд. М : Энергоатомиздат, 1989. 496 с. (16)
4. В.М.Березин, В.С.Буряк, Э.М.Гутцайт, В.П.Марин. Электронные приборы СВЧ. М. : Высшая школа,1985. 296 с.(1)
5. Гапонов В.И. Электроника, ч.1, 2.М.: 1960.(25)
6. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. Наука. М.:1966.(2)
7. Жигарев А.А. Электронно-лучевые и фотоэлектронные приборы. ВШ. М.: 1982.(0)

б) дополнительная литература

1. Электронные приборы сверхвысоких частот. Уч. пособие под ред. В.М.Шевчика и М.А.Григорьева. Изд. СГУ. Саратов: 1980.(0)
2. Царев Б.М. Расчет и конструирование электронных ламп. Энергия. 1967.(0)
3. Мюллер Р.Б. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. Мир., М.: 1984.(0)
4. Соболева Н.А., Берковский А.Г. и др. Фотоэлектронные приборы. Наука. М.: 1963.(2)
5. Бродский Л.Н., Гуревич Ю.Я. Теория электронной эмиссии из металлов. Наука., М.: 1963.(0)
6. Власов В.Ф. Электронные и ионные приборы. Связьиздат., М., 1960.(3)
7. Электроника : Энцикл. словарь/ Гл. ред. В.Г.Колесников. М. : Сов. энцикл., 1991. 688с.(0)

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Лекционный зал с проектором.

Программа составлена в соответствии с требованиями ОС ННГУ с учетом рекомендаций и ОПОП ВПО по направлению 02.03.02 Фундаментальная информатика и информационные технологии.

Автор _____Заславский В.Ю.

Рецензент (ы) _____Орлов И.Я.

Заведующий кафедрой_____Бельков С.А

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от 25 мая 2023 № 04/23.