

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Высшая школа общей и прикладной физики

УТВЕРЖДЕНО

решением Ученого совета ННГУ

протокол № 10 от 02.12.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Вакуумная электроника

Уровень высшего образования

Бакалавриат

Направление подготовки / специальность

03.03.02 - Физика

Направленность образовательной программы

Фундаментальная физика

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2025 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.04.01 Вакуумная электроника относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-2: Способен применять в научно-исследовательской деятельности профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных дисциплин	ПК-2.1: Демонстрация способности применять в научно-исследовательской деятельности профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных дисциплин	ПК-2.1: Знать теорию линейных и нелинейных процессов в электронных усилителях и генераторах с распределенным взаимодействием в комплексе с основами курсов теоретической физики, на которых базируется высокочастотная электроника. Уметь пользоваться основными уравнениями теории электронных усилителей и генераторов для описания процессов электронно-волнового взаимодействия. Владеть навыками расчета электронных усилителей и генераторов.	Задачи Индивидуальное устное собеседование	Экзамен: Задачи Контрольные вопросы
ПК-4: Способен использовать полученные профессиональные знания при реализации научно-исследовательских, научно-инновационных и практических проектов	ПК-4.1: Демонстрация способности использовать полученные профессиональные знания при реализации научно-исследовательских, научно-инновационных и практических проектов	ПК-4.1: Знать основные современные методы анализа, синтеза и обработки физической информации в области волновых процессов в распределенных электронных системах. Уметь использовать современные методы анализа, синтеза и обработки физической информации в распределенных электронных	Задачи Индивидуальное устное собеседование	Экзамен: Задачи Контрольные вопросы

		системах с целью исследования существующих и разработки новых приборов СВЧ. Владеть навыками современных методов анализа, синтеза и об-работки физической информации в области волновых процессов в распределенных электронных системах.		
--	--	---	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	3
Часов по учебному плану	108
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	24
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	24
- КСР	2
самостоятельная работа	22
Промежуточная аттестация	36 Экзамен

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о
Введение в вакуумную электронику	6	2	2	4	2
Классификация электронных генераторов и усилителей по механизмов индуцированного излучения	6	2	2	4	2
Приборы, основанные на черенковском излучении: ЛБВ ЛОВ, магнетрон, клистрон	12	4	4	8	4
Приборы, основанные на циклотронном механизме излу-чения: мазеры	12	4	4	8	4

на цикло-тронном резонансе, гиротроны					
Приборы, основанные на ондуляторном излучении и вынужденном рассеянии волн –убитроны, лазеры на свободных электронах	12	4	4	8	4
Методы организации обратной связи в приборах классической и квантовой электроники	10	4	4	8	2
Методы электродинамической и электронной селекции мод в мощных электронных ге-нераторах и усилителях	12	4	4	8	4
Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	108	24	24	50	22

Содержание разделов и тем дисциплины

Введение в вакуумную электронику

Классификация электронных генераторов и усилителей по механизмов индуцированного излучения

Приборы, основанные на черенковском излучении: ЛБВ ЛОВ, магнетрон , клистрон

Приборы, основанные на циклотронном механизме излу-чения: мазеры на цикло-тронном резонансе, гиротроны

Приборы, основанные на ондуляторном излучении и вынужденном рассеяния волн –убитроны, лазеры на свободных электронах

Методы организации обратной связи в приборах классической и квантовой электроники

Методы электродинамической и электронной селекции мод в мощных электронных ге-нераторах и усилителях

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Для самостоятельной работы обучающимся предлагается использовать основную и дополнительную литературу и/или электронные Интернет-ресурсы.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Индивидуальное устное собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-2:

1. Основные характеристики гиротронов.
2. Абсолютная и конвективная неустойчивость. Лампы бегущей и обратной волны.
3. Пусть электрон излучает при движении со сверхсветовой скоростью в волноводе, заполненном диэлектриком. Что будет, если в таких условиях движется непрерывный электронный поток с однородным распределением плотности.

4. Механизмы электродинамической и электронной селекции мод в гиротронах.
5. Почему доплеровское смещение частоты при излучении релятивистского электрона в направлении поступательного движения значительно больше при осцилляциях в поле ондулятора по сравнению с подобными же осцилляциями при движении в однородном магнитном поле.
6. Какая энергия преобразуется в энергию излучения в МЦР, ЛСЭ и черенковских приборах.
7. Как меняется поперечный импульс электрона при циклотронном излучении в области нормального и аномального эффекта Доплера.
8. Эффект авторезонанса при циклотронном взаимодействии электрона бегущей электромагнитной волной с фазовой скоростью равной скорости света
9. Сходства и отличия принципов действия ЛБВ и линейных ускорителей электронов
10. Механизм формирования усредненной ponderomotive силы в лазерах на свободных электронах.
11. Механизм синхронизации мод и формирования периодической последовательности световых импульсов в ЛСЭ.
12. Частотные зависимости активной и реактивной частей проводимости, вносимой электронным пучком в резонатор.

5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Индивидуальное устное собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-4:

1. Основные характеристики гиротронов.
2. Абсолютная и конвективная неустойчивость. Лампы бегущей и обратной волны.
3. Пусть электрон излучает при движении со сверхсветовой скоростью в волноводе, заполненном диэлектриком. Что будет, если в таких условиях движется непрерывный электронный поток с однородным распределением плотности.
4. Механизмы электродинамической и электронной селекции мод в гиротронах.
5. Почему доплеровское смещение частоты при излучении релятивистского электрона в направлении поступательного движения значительно больше при осцилляциях в поле ондулятора по сравнению с подобными же осцилляциями при движении в однородном магнитном поле.
6. Какая энергия преобразуется в энергию излучения в МЦР, ЛСЭ и черенковских приборах.
7. Как меняется поперечный импульс электрона при циклотронном излучении в области нормального и аномального эффекта Доплера.
8. Эффект авторезонанса при циклотронном взаимодействии электрона бегущей электромагнитной волной с фазовой скоростью равной скорости света
9. Сходства и отличия принципов действия ЛБВ и линейных ускорителей электронов
10. Механизм формирования усредненной ponderomotive силы в лазерах на свободных электронах.
11. Механизм синхронизации мод и формирования периодической последовательности световых импульсов в ЛСЭ.
12. Частотные зависимости активной и реактивной частей проводимости, вносимой электронным пучком в резонатор.

Критерии оценивания (оценочное средство - Индивидуальное устное собеседование)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов. Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач.
отлично	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок. Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме. Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.
очень хорошо	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.
хорошо	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.
удовлетворительно	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибки. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме. Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами.
неудовлетворительно	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.
плохо	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие минимальных умений . Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа.

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

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

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой

	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-2

1. СВЧ приборы, основанные на черенковском механизме индуцированного излучения электронных потоков (ЛБВ, ЛОВ, клистрон).
- 2 . Дисперсионное уравнение ЛБВ. Высокочастотный пространственный заряд (режимы взаимодействия на волнах пространственного заряда и частицах)
3. Абсолютная и конвективная неустойчивость. Основные типы электронных генераторов и усилителей
4. Теорема Флоке. Основные свойства периодически гофрированных волноводов
5. ЛБВ- нелинейная теория, оценки КПД и области оптимальных параметров ЛБВ на основе анализа условий синхронизма
6. Резонансные генераторы. Восприимчивость, вносимая электронным пучком в резонатор
7. Лампа обратной волны
8. Клистрон
9. Магнетрон (принцип действия, сходства и отличие от ЛБВ.)
10. СВЧ приборы, основанные на циклотронном механизме индуцированного излучения электронных потоков (МЦР, гиротрон). Нормальный и аномальный эффекты Доплера.
11. Оценки КПД и области оптимальных параметров МЦР, на основе анализа условий синхронизма и требований на величину начальной вращательной энергии частиц.
12. Линейная теория МЦР (дисперсионное уравнение и его анализ).
13. Гиротрон. Уравнения движения частиц в гиротроне (уравнение неизохронного осциллятора).

14. Генераторы, основанные на ондуляторном механизме индуцированного излучения электронных потоков и вынужденном рассеянии волн (лазеры на свободных электронах). Доплеровское преобразование частоты.

15. Пондеромоторная сила. Усредненные уравнения движения частиц в ЛСЭ.

16. Механизм повышения КПД ЛСЭ на основе использования режима обращенного линейного ускорителя.

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-4

1. СВЧ приборы, основанные на черенковском механизме индуцированного излучения электронных потоков (ЛБВ, ЛОВ, клистрон).

2 . Дисперсионное уравнение ЛБВ. Высокочастотный пространственный заряд (режимы взаимодействия на волнах пространственного заряда и частицах)

3. Абсолютная и конвективная неустойчивость. Основные типы электронных генераторов и усилителей

4. Теорема Флоке. Основные свойства периодически гофрированных волноводов

5. ЛБВ- нелинейная теория, оценки КПД и области оптимальных параметров ЛБВ на основе анализа условий синхронизма

6. Резонансные генераторы. Восприимчивость, вносимая электронным пучком в резонатор

7. Лампа обратной волны

8. Клистрон

9. Магнетрон (принцип действия, сходства и отличие от ЛБВ.)

10. СВЧ приборы, основанные на циклотронном механизме индуцированного излучения электронных потоков (МЦР, гиротрон). Нормальный и аномальный эффекты Доплера.

11. Оценки КПД и области оптимальных параметров МЦР, на основе анализа условий синхронизма и требований на величину начальной вращательной энергии частиц.

12. Линейная теория МЦР (дисперсионное уравнение и его анализ).

13. Гиротрон. Уравнения движения частиц в гиротроне (уравнение неизохронного осциллятора).

14. Генераторы, основанные на ондуляторном механизме индуцированного излучения электронных потоков и вынужденном рассеянии волн (лазеры на свободных электронах). Доплеровское преобразование частоты.

15. Пондеромоторная сила. Усредненные уравнения движения частиц в ЛСЭ.

16. Механизм повышения КПД ЛСЭ на основе использования режима обращенного линейного ускорителя.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов. Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач.
отлично	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок. Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме. Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.
очень хорошо	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.
хорошо	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.
удовлетворительно	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибки. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме. Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами.
неудовлетворительно	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.
плохо	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие минимальных умений . Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Ландау Лев Давидович. Теоретическая физика : учеб. пособие для студентов физ. специальностей ун-тов : в 10 т. Т. 2. Теория поля / под ред. Л. П. Питаевского. - Изд. 8-е, стер. - М. : Физматлит, 2006. - 536 с. - ISBN 5-9221-0056-4 (т. 2) : 323.84., 1 экз.
2. Ландау Лев Давидович. Теоретическая физика. Том 8. Электродинамика сплошных сред : Учебное пособие. - 5-е изд. - Москва : Издательская фирма "Физико-математическая литература" (ФИЗМАТЛИТ), 2016. - 656 с. - ВО - Бакалавриат. - ISBN 978-5-9221-1702-9., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=741032&idb=0>.
3. Вайнштейн Лев Альбертович. Лекции по сверхвысококачастотной электронике. - М. : Советское радио, 1973. - 399 с. : черт. - 1.91., 56 экз.
4. Трубецков Дмитрий Иванович. Лекции по сверхвысококачастотной электронике для физиков : в 2 т. - М. : Физматлит, 2003-. Лекции по сверхвысококачастотной электронике для физиков. Т. 2. - М., 2004. - 648 с. - ISBN 5-9221-0200-1 (Т. 2) : 75.00., 2 экз.
5. Трубецков Дмитрий Иванович. Лекции по сверхвысококачастотной электронике для физиков : в 2 т. Т. 1. - М. : Физматлит, 2003. - 496 с. - ISBN 5-9221-0372-5. - ISBN 5-9221-0371-7 : 55.00., 2 экз.

Дополнительная литература:

1. Гапонов Виктор Иванович. Электроника : учеб. пособие для вузов. Ч. 1. Физические основы / [ред. В. Б. Брагинский]. - М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. - 516 с. - 1.06., 24 экз.
2. Гапонов Виктор Иванович. Электроника : учеб. пособие для вузов. Ч. 2. Электровакуумные и полупроводниковые приборы / [ред. В. Б. Брагинский]. - М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. - 592 с. - 1.27., 27 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

- 1) Публикации ИПФРАН, Релятивистская высокочастотная электроника
http://www.iapras.ru/biblio/rve_1.html
- 2) Публикации ИПФРАН, Релятивистская высокочастотная электроника
Проблемы повышения мощности и частоты излучения http://www.iapras.ru/biblio/rve_2.html

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории. Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей студенты имеют возможность работать в компьютерных классах с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет. Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети Интернет и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

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

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 03.03.02 - Физика.

Автор(ы): Гинзбург Наум Самуилович, доктор физико-математических наук, профессор.

Заведующий кафедрой: Викторов Михаил Евгеньевич, кандидат физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 31.01.2025, протокол № 2.