

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

---

УТВЕРЖДЕНО  
решением Ученого совета ННГУ  
протокол № 10 от 02.12.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Вакуумная электроника

---

Уровень высшего образования  
Бакалавриат

---

Направление подготовки / специальность  
02.03.02 - Фундаментальная информатика и информационные технологии

---

Направленность образовательной программы  
Информационные системы и технологии

---

Форма обучения  
очная

---

г. Нижний Новгород

2025 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.15 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-1: Способен собирать, обрабатывать и интерпретировать данные современных научных исследований, необходимые для формирования подходов, решений и выводов по соответствующим научным и профессиональным проблемам	<p>ПК-1.1: Знает методы обработки и интерпретации данных научных исследований</p> <p>ПК-1.2: Умеет собирать, обрабатывать и интерпретировать данные современных научных исследований</p> <p>ПК-1.3: Имеет практический опыт сбора, обработки и интерпретации данных научных исследований</p>	<p>ПК-1.1: Знать уравнения движения в электромагнитном поле в общем случае и в случае однородных электрического и магнитного полей.</p> <p>ПК-1.2: Уметь приобретать новые знания в области физической электроники, используя современные образовательные и информационные технологии</p> <p>Уметь применять базовые знания в области математики для решения стандартных задач физической электроники.</p> <p>ПК-1.3: Владеть навыком анализа режимов температурного ограничения эмиссии и ограничения тока пространственным зарядом в электронных диодах.</p> <p>Владеть навыком классификации электромагнитных линз.</p>	Отчет по лабораторным работам	Зачёт: Контрольные вопросы Задачи

## 3. Структура и содержание дисциплины

### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>2</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>72</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>32</b>
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>16</b>
- КСР	<b>1</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>23</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>0</b> <b>Зачёт</b>

### 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	
0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	
1. Введение.	3	2		2	1
2. Движение электронов в электрическом и магнитном статических полях.	7	2	4	6	1
3. Электронно-оптические свойства полей с аксиальной симметрией. Электронные линзы.	3	2		2	1
4. Электронно-оптические системы.	3	2		2	1
5. Интенсивные электронные пучки.	5	2	2	4	1
6. Общие вопросы эмиссионной электроники.	5	2	2	4	1
7. Термоэлектронная эмиссия.	5	2	2	4	1
8. Полевая эмиссия.	3	2		2	1
9. Вторичная электронная эмиссия.	5	2	2	4	1
10. Фотоэлектронная эмиссия.	3	2		2	1
11. Технические применения фото- и вторичной эмиссии	3	2		2	1
12. Основные понятия электроники СВЧ.	7	2	4	6	1
13. Клистроны.	4	2		2	2
14. Лампы бегущей и обратной волны типа О (ЛБВ-О, ЛОВ-О)	4	2		2	2

15. ЛБВ М-типа. Магнетрон.	3	1		1	2
16. Релятивистская высокочастотная электроника.	2	1		1	1
17. Лазеры и мазеры на свободных электронах.	2	1		1	1
18. Вакуумная микроэлектроника СВЧ.	4	1		1	3
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	72	32	16	49	23

### Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение.
2. Движение электронов в электрическом и магнитном статических полях.
3. Электронно-оптические свойства полей с аксиальной симметрией. Электронные линзы.
4. Электронно-оптические системы.
5. Интенсивные электронные пучки.
6. Общие вопросы эмиссионной электроники.
7. Термоэлектронная эмиссия.
8. Полевая эмиссия.
9. Вторичная электронная эмиссия.
10. Фотоэлектронная эмиссия.
11. Технические применения фото- и вторичной эмиссии.
12. Основные понятия электроники СВЧ.
13. Клистроны.
14. Лампы бегущей и обратной волны типа О (ЛБВ-О, ЛОВ-О)
15. ЛБВ М-типа. Магнетрон.
16. Релятивистская высокочастотная электроника.
17. Лазеры и мазеры на свободных электронах.
18. Вакуумная микроэлектроника СВЧ.

Практические занятия /лабораторные работы организуются, в том числе, в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 4 ч.

#### 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.

--

#### 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 - Отчет по лабораторным работам) для оценки сформированности компетенции ПК-1:

1. В каких режимах может работать диод? Чем они отличаются?
2. Нарисовать вольт-амперные характеристики диода для трех различных схем включения в одной координатной системе. Сравнить графики. При каких потенциалах наиболее существенны отличия в графиках?
3. Как образуется потенциальный барьер на границе твердого тела? Что такое работа выхода?
4. Объяснить эффект Шоттки.
5. Как измерять работу выхода?
6. Какие особенности конструкции триода обеспечивают свойство усиления сигнала? При каких условиях он является усилителем тока, а при каких – напряжением?
7. Что такое эквивалентный диод?
8. Как сводится триод к эквивалентному диоду?
9. Чем отличается режим возврата от режима прямого перехвата?
10. Какие основные параметры триода? Дать их определения и рассказать, как их определять по вольт-амперным характеристикам.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Минимально допустимый уровень знаний и выше. Допущенные ошибки не являлись грубыми. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи, возможны негрубые ошибки. Выполнены все задания. Имеется минимальный и выше набор навыков для решения стандартных задач, допускаются некоторые недочеты.
не зачтено	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения и базовые навыки.

## 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	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.

	знаний вследствие отказа обучающегося от ответа		много негрубых ошибок	подготовки . Допущено несколько негрубых ошибок	подготовки . Допущено несколько несущественных ошибок	подготовк и. Ошибок нет.	
<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	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продемонстрированы 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 некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	<b>превосходно</b>	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
	<b>отлично</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	<b>очень хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	<b>хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	<b>удовлетворительно</b>	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	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».

### 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-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. Классификация электростатических линз. Построение изображения в тонкой и толстой линзах.
4. Классификация магнитных линз. Понятие о квадрупольных линзах и электронных зеркалах. Виды аберраций электронных линз.
5. Виды электронных микроскопов (эмиссионный, просвечивающий, отражательный, растровый, автоэлектронный, автоионный), принцип их действия.
6. Отличия режимов температурного ограничения эмиссии и ограничения тока пространственным зарядом в электронных диодах. Закон “трех вторых” для плоского диода.
7. Пушки Пирса. Предельный ток транспортировки электронного пучка в пространстве дрейфа.
8. Силы, действующие на электрон при выходе из твердого тела. Профиль потенциального барьера на границе твердого тела.
9. Изменение профиля потенциального барьера на границе твердого тела под действием внешнего электрического поля. Эффект Шоттки. Автоэлектронная и взрывная эмиссия.
10. Основные законы внешнего фотоэффекта (законы Столетова и Эйнштейна). Типы фотокатодов и их сравнительные характеристики.
11. Принцип работы и быстродействие фотоэлементов с внешним фотоэффектом. Фотоумножители.
12. Статическое и динамическое управление электронным потоком. Скоростная модуляция электронного потока. Уравнение скоростной модуляции.
13. Устройство и принцип действия двухрезонаторного пролетного клистрона. Пространственно-временная диаграмма. Принцип работы многорезонаторного клистрона.
14. Отражательный клистрон. Устройство, пространственно-временная диаграмма.
15. Принцип действия ЛБВ-О. Свойства периодических замедляющих систем ЛБВ-О. Пространственные гармоники. Устройство ЛБВ.
16. Принцип действия лампы обратной волны. Дисперсионная характеристика замедляющей системы. Распределение поля и тока, электронная перестройка частоты.
17. Принцип действия, устройство и группировка электронов в ЛБВ-М.
18. Статический режим работы магнетрона. Электронное облако в негенерирующем магнетроне. Колебательные системы магнетронов,  $\pi$ -вид колебаний. Группировка электронов и КПД магнетрона.
19. Принцип работы МЦР. Оценки оптимальных параметров.
20. Причины увеличения ускоряющего напряжения в электронных приборах СВЧ. ЭОС релятивистских приборов. Релятивистская ЛБВ, МЦАР и убитрон.
21. 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.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Минимально допустимый уровень знаний и выше. Допущенные ошибки не являлись грубыми. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи, возможны негрубые ошибки. Выполнены все задания. Имеется минимальный и выше набор навыков для решения стандартных задач, допускаются некоторые недочеты.
не зачтено	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения и базовые навыки.

### 5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности 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. Пользуясь методом полного тока найти время пролета электрона в диоде в режиме ограничения тока пространственным зарядом.
4. 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.
5. Найти связь между номером зоны генерации  $n$  и потенциалом  $U_{отр}$  отражателя в отражательном клистроне.
6. Оценить, на каком расстоянии  $x$  от замедляющей системы надо пропускать электронный пучок, если  $\lambda =3$  см,  $U_0=1$  кВ.
7. 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  $\theta$ , если период системы  $D=4$ мм.
8. Найти величину фазовой скорости в ЛБВ-М на границах полосы усиления, если  $\lambda =3$  см,  $I_0=3$  mA,  $R_c=50$  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.
9. Найти фазовую скорость для  $\pi$ -вида колебаний в 24-резонаторном магнетроне, если  $\lambda=10$  см,  $R_a=5$  см. Чему примерно равно замедление и анодное напряжение?
10. Оценить оптимальные параметры гиротрона, если  $U_0=70$  кВ,  $\lambda=2.14$  мм,  $g=1$ , длина резонатора  $L=10$  см.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Минимально допустимый уровень знаний и выше. Допущенные ошибки не являлись грубыми. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи, возможны негрубые ошибки. Выполнены все задания. Имеется минимальный и выше набор навыков

Оценка	Критерии оценивания
	для решения стандартных задач, допускаются некоторые недочеты.
не зачтено	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения и базовые навыки.

## 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. 8. Электродинамика сплошных сред / перераб. и доп. Е. М. Лифшицем, Л. П. Питаевским. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. - 624 с. - 60.00., 373 экз.
2. Жеребцов Иван Петрович. Основы электроники. - 5-е изд., перераб. и доп. - Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1989. - 352 с. : ил. - ISBN 5-283-04448-3 (в пер.) : 3.00., 2 экз.
3. Электронные приборы : [учеб. для вузов по специальности "Радиотехника"] / под ред. Г. Г. Шишкина. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергоатомиздат, 1989. - 494, [1] с. : ил. - ISBN 5-283-01472-X (в пер.) : 1.40., 44 экз.
4. Электронные приборы СВЧ : [учеб. пособие для вузов по специальности "Электрон. приборы"]. - М. : Высшая школа, 1985. - 296 с. : ил. - 1.10., 42 экз.
5. 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.
6. Добрецов Леонтий Николаевич. Эмиссионная электроника. - М. : Наука, 1966. - 564 с. - б/ц., 6 экз.
7. Жигарев Андрей Александрович. Электронная оптика и электронно-лучевые приборы : учеб. для вузов специальности "Электронные приборы". - М. : Высшая школа, 1972. - 539 с. : ил. - 1.33., 6 экз.

Дополнительная литература:

1. Электронные приборы сверхвысоких частот : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Радиофизика и электроника" / под ред. В. Н. Шевчика, М. А. Григорьева. - 2-е изд., перераб. и доп. - Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1980. - 416 с. - 1.10., 41 экз.
2. Царев Борис Михайлович. Расчет и конструирование электронных ламп. - Изд. 3-е, испр. и доп. - М. : Энергия, 1967. - 671 с. : ил. - 1.93., 1 экз.
3. Миллер Р. Б. Введение в физику сильнооточных пучков заряженных частиц / пер. с англ. А. В. Агафонова ; под ред. А. А. Коломенского. - М. : Мир, 1984. - 432 с. : ил. - 3.70., 2 экз.
4. Фотоэлектронные приборы / под ред. Д. В. Зернова. - М. : Наука, 1965. - 592 с. : ил. - (Физико-математическая библиотека инженера). - 1.74., 4 экз.
5. Бродский Анатолий Моисеевич. Теория электронной эмиссии из металлов. - М. : Наука, 1973. - 255 с. : черт. - (Современные проблемы физики). - 1.22., 1 экз.
6. Власов Владимир Федорович. Электронные и ионные приборы : [учеб. пособие для радиотехн. вузов и фак.]. - Изд. 3-е, перераб. и доп. - М. : Связьиздат, 1960. - 734 с. : ил. - 1.70., 2 экз.

7. Электроника : энцикл. словарь / гл. ред. В. Г. Колесников. - М. : Советская энциклопедия, 1991. - 688 с. : ил. - ISBN 5-85270-062-2 (в пер.) : 18.00., 3 экз.

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

--

### **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

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 ОС ННГУ по направлению подготовки/специальности 02.03.02 - Фундаментальная информатика и информационные технологии.

Автор(ы): Заславский Владислав Юрьевич, кандидат физико-математических наук  
Лещева Ксения Александровна, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Оболенский Сергей Владимирович, доктор технических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 28.11.2024, протокол № 06/24.