

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Структурное подразделение «Радиоэлектроники и телекоммуникационных систем»

УТВЕРЖДЕНА:
на заседании кафедры
Протокол №13 от 02 июня 2025 г.

Рабочая программа дисциплины

«ВАКУУМНАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

Направление: 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

Компоненты микро- и наносистемной техники

Квалификация: Бакалавр

Форма обучения: очная

Документ подписан простой
электронной подписью
Составитель программы:
Строкин Николай
Александрович
Дата подписания: 01.07.2025

Документ подписан простой
электронной подписью
Утвердил: Ченский Александр
Геннадьевич
Дата подписания: 05.07.2025

Документ подписан простой
электронной подписью
Согласовал: Ниндакова Лидия
Очировна
Дата подписания: 02.07.2025

Год набора – 2025

Иркутск, 2025 г.

1 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

1.1 Дисциплина «Вакуумная и плазменная электроника» обеспечивает формирование следующих компетенций с учётом индикаторов их достижения

Код, наименование компетенции	Код индикатора компетенции
ПКР-9 Готовность работать на современном технологическом оборудовании, используемом в производстве материалов и компонентов нано- и микросистемной техники	ПКР-9.5

1.2 В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы

Код индикатора	Содержание индикатора	Результат обучения
ПКР-9.5	Понимает назначение и принципы работы основных типов вакуумных и плазменных приборов, знает их характеристики и параметры. Находит применение для электровакуумных и плазменных устройств, определяет для них задачи в современном оборудовании для производства и исследования компонентов микро- и наносистемной техники	Знать основные типы вакуумных и плазменных приборов, их характеристики и параметры. Уметь использовать вакуумные и плазменные электронные приборы для построения базового технологического оборудования, применяемого в производстве материалов, компонентов нано- и микросистемной техники. Владеть навыками анализа тенденций развития вакуумной и плазменной электроники, ее элементной и технологической базы, применяемой для построения базового технологического оборудования, применяемого в производстве материалов, компонентов нано- и микросистемной техники.

2 Место дисциплины в структуре ООП

Изучение дисциплины «Вакуумная и плазменная электроника» базируется на результатах освоения следующих дисциплин/практик: «Физические основы электроники», «Физические основы оптоэлектроники», «Электроника и схемотехника», «Производственная практика: практика по получению профессиональных умений и опыта профессиональной деятельности»

Дисциплина является предшествующей для дисциплин/практик: «Материалы и элементы электронной техники», «Квантовая и оптическая электроника»

3 Объем дисциплины

Объем дисциплины составляет – 5 ЗЕТ

Вид учебной работы	Трудоемкость в академических часах (Один академический час соответствует 45
--------------------	--

	минутам астрономического часа)	
	Всего	Семестр № 7
Общая трудоемкость дисциплины	180	180
Аудиторные занятия, в том числе:	80	80
лекции	32	32
лабораторные работы	16	16
практические/семинарские занятия	32	32
Самостоятельная работа (в т.ч. курсовое проектирование)	64	64
Трудоемкость промежуточной аттестации	36	36
Вид промежуточной аттестации (итогового контроля по дисциплине)	Экзамен	Экзамен

4 Структура и содержание дисциплины

4.1 Сводные данные по содержанию дисциплины

Семестр № 7

№ п/п	Наименование раздела и темы дисциплины	Виды контактной работы						СРС		Форма текущего контроля
		Лекции		ЛР		ПЗ(СЕМ)				
		№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Введение	1	1			1	1			Устный опрос
2	Электронная эмиссия	2	7	5	2	2, 3	4	5	12	Тест
3	Формирование и транспортировка электронного потока	3	3	7	2	4, 5	3			Тест
4	Управление параметрами электронного потока	4	4	4	2	6, 7	4	1, 2	26	Тест
5	Преобразование энергии электронного потока в другие виды энергии	5	5			8, 9, 10	6	3	14	Тест
6	Ионизованный газ и плазма	6	6	1, 2	4	13, 14	5	4	12	Тест
7	Общие свойства плазмы	7	4	3, 6	6	11, 12, 15, 16	9			Тест
8	Заключение	8	2							Устный опрос
	Промежуточная аттестация								36	Экзамен
	Всего		32		16		32		100	

4.2 Краткое содержание разделов и тем занятий

Семестр № 7

№	Тема	Краткое содержание
1	Введение	Вакуумная и плазменная электроника – одна из основных частей современной электроники. Краткая история развития вакуумной и плазменной электроники.
2	Электронная эмиссия	Основы электронной теории твердого тела. Термоэлектронная эмиссия. Автоэлектронная эмиссия. Вторично-электронная эмиссия. Фотоэлектронная эмиссия.
3	Формирование и транспортировка электронного потока	Интенсивные и неинтенсивные, релятивистские и нерелятивистские электронные потоки. Способы формирования электронных потоков различной интенсивности: электронные пушки и прожекторы. Транспортировка электронного потока и способы ограничения его поперечных размеров. Примеры использования электронных потоков в приборах вакуумной электроники.
4	Управление параметрами электронного потока	Электрические и магнитные способы управления плотностью и скоростью электронных потоков. Квазистатические и динамические способы управления плотностью и скоростью электронных потоков. Примеры использования различных способов управления плотностью и скоростью электронных потоков в приборах вакуумной электроники.
5	Преобразование энергии электронного потока в другие виды энергии	Способы преобразования, основанные на взаимодействии электронов с внешними электромагнитными полями. Энергетический эффект взаимодействия электронов с внешними электромагнитными полями. Способы преобразования, основанные на взаимодействии с твердыми телами. Эффекты взаимодействия: катодolumинесценция, катодоусиление, рентгеновское излучение, нагрев. Примеры использования преобразования энергии электронного потока в другие виды энергии в приборах вакуумной электроники.
6	Ионизованный газ и плазма	Элементарные процессы в плазме и на пограничных поверхностях. Основные методы генерации плазмы. Модели для описания плазмы. Типы газовых разрядов.
7	Общие свойства плазмы	Явления переноса в плазме. Плазма в магнитном поле. Колебания плазмы. Неустойчивости плазмы. Излучение плазмы. Методы ускорения плазменных потоков. Диагностика параметров плазмы. Применение плазмы в электронике.
8	Заключение	Основные тенденции и перспективы развития ваку-умной и плазменной электроники.

4.3 Перечень лабораторных работ

Семестр № 7

№	Наименование лабораторной работы	Кол-во академических часов
1	Закономерности пробоя газового межэлектродного промежутка. Закон Пашена.	2
2	Расчет сечения объемной ионизации атомов электронным ударом.	2
3	Электрический зонд в плазме; вольт–амперная характеристика.	3
4	Ускорение заряженных частиц электрическим полем. Расчет скоростей.	2
5	Вторичная электронная эмиссия.	2
6	Исследование газового разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях.	3
7	Изучение закономерностей токораспределения в электронных лампах с сетками.	2

4.4 Перечень практических занятий

Семестр № 7

№	Темы практических (семинарских) занятий	Кол-во академических часов
1	Основы электронной теории твердого тела.	1
2	Термоэлектронная эмиссия.	2
3	Вторично-электронная эмиссия. Фотоэлектронная эмиссия.	2
4	Способы формирования электронных потоков различной интенсивности: электронные пушки и прожекторы.	2
5	Транспортировка электронного потока и способы ограничения его поперечных размеров.	1
6	Электрические и магнитные способы управления плотностью и скоростью электронных потоков.	2
7	Квазистатические и динамические способы управления плотностью и скоростью электронных потоков.	2
8	Способы преобразования энергии электронного потока, основанные на взаимодействии электронов с внешними электромагнитными полями.	2
9	Способы преобразования энергии электронного потока, основанные на взаимодействии с твердыми телами.	2
10	Катодолюминисценция, катодоусиление, рентгеновское излучение.	2
11	Элементарные процессы в плазме.	2

12	Методы генерации плазмы.	2
13	Модели для описания плазмы.	2
14	Типы газовых разрядов.	3
15	Явления переноса в плазме.	2
16	Диагностика параметров плазмы.	3

4.5 Самостоятельная работа

Семестр № 7

№	Вид СРС	Кол-во академических часов
1	Выполнение компьютерных экспериментов и компьютерных лабораторных работ в дистанционном режиме	12
2	Выполнение тренировочных и обучающих тестов	14
3	Оформление отчетов по лабораторным и практическим работам	14
4	Подготовка к практическим занятиям (лабораторным работам)	12
5	Проработка разделов теоретического материала	12

В ходе проведения занятий по дисциплине используются следующие интерактивные методы обучения: Интерактивная лекция; компьютерная симуляция; семинар–дискуссия; разбор конкретных ситуаций.

5 Перечень учебно-методического обеспечения дисциплины

5.1 Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

5.1.1 Методические указания для обучающихся по практическим занятиям

Основной задачей практических занятий студентов является закрепление теоретических знаний, полученных на лекциях. Цель работы – научиться ориентироваться в теоретическом материале, получить навыки решения задач и применения прикладной специализированной компьютерной программы PTC_MathCAD15.

При выполнении задания для практических занятий рекомендуется начать с изучения лекционного материала по рассматриваемой теме. При возникновении неясностей или затруднений в понимании материала следует обратиться к литературе, рекомендованной преподавателем.

Примеры задач

1. Может ли ион лития (масса m_1), обладающей кинетической энергией $E_0 = 60$ эВ, при неупругом соударении с атомом гелия (масса m_2) ионизовать его? Потенциал однократной ионизации атомов гелия равен 24,5 эВ. Скорости иона и атома до соударения, соответственно, u_0 и v_0 ; после соударения – u_1 , v_1 .
2. Вычислите среднюю длину свободного пробега атомов неона (диаметр атома неона составляет $3 \cdot 10^{-10}$ м), а также среднюю длину свободного пробега электронов в этом газе, предполагая, что неон – единственный газ, который присутствует в исследуемом объеме.
3. Температура катода равна 2000 К. Анод и катод представляют собой плоскопараллельные пластины, расположенные на расстоянии 1 см друг от друга. Считаем, что

пространственный заряд не ограничивает плотность тока термоэлектронной эмиссии. Какую разность потенциалов нужно приложить между катодом и анодом, чтобы эмиссионный ток увеличился на 10% по сравнению с величиной, даваемой формулой Ричардсона-Дешмана?

4. Покажите, что электрон, пересекающий под углом α прямолинейную магнитную силовую линию, пересечет ее снова после того, как пролетит расстояние, равное $L = 2mv \cos \alpha / Bq$, где v – скорость электрона; B – величина индукции магнитного поля.

1) Вычислите время, за которое электрон, первоначально находившийся в покое, пролетит расстояние $l = 10$ мм, если разность потенциалов, приложенная на этом расстоянии вдоль направления вектора магнитного поля, равна:

а) постоянному напряжению $U = 100$ В; градиент потенциала является постоянной величиной; ($E = U/l = 100/0,01 = 10^4$ В/м).

б) переменному напряжению, изменяющемуся по синусоидальному закону с амплитудой 25 В и частотой $f = 3$ МГц; электрон находится в покое в тот момент, когда приложенное напряжение равно нулю.

5. Электрон движется в неоне под действием электрического поля напряженностью $E = 5 \cdot 10^3$ В/м. Давление газа $p = 0,25$ мм. рт. ст. Определить – число актов ионизации, совершаемых электроном на пути движения длиной 1 м.

Рекомендуемая литература

1. Трубочкина Н.К. Наноэлектроника и схемотехника в 2 ч. часть 2 [Электронный ресурс]: Учебник / Трубочкина Н.К., 2018. – 250 с.

2. Трубочкина Н.К. Наноэлектроника и схемотехника в 2 ч. часть 1 [Электронный ресурс]: Учебник / Трубочкина Н.К., 2018. – 269 с.

3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда: монография / Ю.П. Райзер, 2009. – 734 с.

4. Фурсей Г.Н. Автоэлектронная эмиссия: учебник / Г.Н. Фурсей, 2012. – 319 с.

5. Щепетов А.Г. Основы проектирования приборов и систем. задачи и упражнения. mathcad для приборостроения [Электронный ресурс]: Учебное пособие / Щепетов А.Г., 2018. – 270 с.

5.1.2 Методические указания для обучающихся по лабораторным работам:

Предназначены для оказания помощи студентам по выполнению лабораторных работ. Содержание лабораторных работ: тема; цель и задачи работы; рекомендуемая литература; краткие сведения по теории; схема выполнения лабораторной работы; задания; контрольные вопросы.

Перечень лабораторных работ

1. Закономерности пробоя газового межэлектродного промежутка. Закон Пашена.

2. Расчет сечения объемной ионизации атомов электронным ударом.

3. Электрический зонд в плазме; вольт–амперная характеристика.

4. Ускорение заряженных частиц электрическим полем. Расчет скоростей.

5. Вторичная электронная эмиссия.

6. Исследование газового разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях.

7. Изучение закономерностей токораспределения в электронных лампах с сетками.

Методические указания и задания к лабораторным работам получают студентами у преподавателя перед их выполнением.

5.1.3 Методические указания для обучающихся по самостоятельной работе:

Самостоятельная работа студентом проводится с целью:

- подготовки к конкретным видам занятий;

- для углубления знаний по учебной дисциплине;
- для расширения кругозора.

Самостоятельная подготовка к конкретным видам занятий включает:

- подготовку к очередной лекции;
- подготовку к лабораторным работам;
- подготовку к практическим работам.

Подготовка к очередной лекции имеет целью освежить в памяти материал предыдущей лекции. При этом также выполняются задания, которые были предложены преподавателем для СРС по теме лекции. Для выяснения всех возникших вопросов используется рекомендованная литература или любая другая литература по теме дисциплины.

Углубление знаний по учебным и смежным с ними вопросам проводится при выполнении заданий преподавателя по самостоятельному изучению отдельных положений предмета. При этом используется основная литература. В конспект вносятся необходимые уточнения и исправления, а также (на полях) дописываются новые сведения.

Расширение кругозора реализуется вследствие личной заинтересованности студента и его стремления самостоятельно получить новые знания сверх учебной программы при выполнении конкретных технических заданий, в результате участия в научно-исследовательской работе кафедры, студенческом научно-методическом семинаре, при выполнении курсовых и дипломных проектов. Для расширения кругозора должна использоваться дополнительная литература и научно-технические периодические издания. При этом не следует ограничиваться конечным объемом знаний, изучаемым на лекциях. Следует искать взаимосвязи с другими техническими дисциплинами в рамках своей специальности и смежными специальностями. Поля конспекта – это место конспектирования дополнительного материала по данной теме.

При самостоятельной подготовке по учебной дисциплине «Электроника и схемотехника» необходимо использовать учебники и конспекты лекций по математике (дифференциальное и интегральное исчисление), а также учебники и конспекты лекций по учебным дисциплинам «Физика», «Электротехника». Для правильной организации самостоятельной работы студента большое значение имеют:

- выработка навыков планирования своего учебного и внеучебного времени;
- выбор приоритетов;
- своевременное и правильное составление конспектов лекций по изучаемым дисциплинам.

Планирование времени включает распределение временных затрат по видам учебной деятельности. При этом, независимо от учебного плана, первоначально студентом должно быть принято правило: 1 час самостоятельной работы на 1 час затрат учебного времени по расписанию.

Приоритеты следует определять, руководствуясь объемом учебной дисциплины в часах. Доступность и относительная простота учебной дисциплины для конкретного студента не должна быть критерием расстановки приоритетов. В основу должна быть положена систематичность изучения, поиск ответов на все непонятные вопросы. Следует придерживаться правила: чем больше потрачено времени на учебную дисциплину в начале изучения, тем больше будет экономия времени при отчетности.

6 Фонд оценочных средств для контроля текущей успеваемости и проведения промежуточной аттестации по дисциплине

6.1 Оценочные средства для проведения текущего контроля

6.1.1 семестр 7 | Устный опрос

Описание процедуры.

Тема (раздел): Введение

Описание процедуры – пример вопроса для контроля: «Какие есть способы, чтобы «заставить» электронов перейти на более высокие энергетические уровни, в том числе, в зону проводимости?»

Тема (раздел): Заключение

Описание процедуры – пример вопросов для контроля: «Назовите устройства регистрации корпускулярного и электромагнитного излучения с сохранением информации о месте излучения – координатно-чувствительные регистраторы».

Критерии оценивания.

Критерии оценки: зачтено – если ответ однозначно правильный или выявляется способность к анализу сути вопроса, высказывания альтернативных вариантов.

6.1.2 семестр 7 | Тест

Описание процедуры.

Описание процедуры: каждому студенту выдается раздаточный материал – карточки с тестовыми заданиями (2 подраздела темы; в каждом по 3 вопроса с вариантами ответов).

Тестирование

Тема (раздел): Электронная эмиссия

Вопросы для контроля:

1.

Автоэлектронная эмиссия

Варианты ответа Да Нет

1. Внешнее ускоряющее электрическое поле увеличивает потенциальный барьер на величину $\Delta\phi = e^{3/2} / \sqrt{4\pi\epsilon_0} \sqrt{E}$; при этом возрастает ток эмиссии.

2. Предельная плотность тока автоэлектронной эмиссии из металла $j_{Am} \approx (\epsilon_{em} e \phi_{eff}^2) / h^3$, где ϕ_{eff} – работа выхода.

3. Автоэлектронная эмиссия сильно зависит от температуры T: $(j(T) - j(0)) / j(0) \approx 1,4 \cdot 10^{-8} \phi T^2 / E^2$, где j – плотность тока автоэлектронной эмиссии, E – напряженность электрического поля, ϕ – работа выхода.

2.

Фотоэлектронная эмиссия

Варианты ответа Да Нет

1. Формула Эйнштейна для фотоэффекта связывает частоту падающего фотона, работу выхода электрона, ширину запрещенной зоны и кинетическую энергию вылетающего электрона: $h\nu = A + mV^2/2$.

2. Второй закон фотоэффекта: максимальная кинетическая энергия вырванных светом электронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.

3. Граница фотоэффекта (красная), т. е. максимальная длина волны или минимальная частота ν_0 , определяется равенством $h\nu_0 - A = 0$ (A – работа выхода).

Тема (раздел): Формирование и транспортировка электронного потока

Вопросы для контроля:

1.

Формирование электронного потока

Варианты ответа Да Нет

1. Наиболее мощные электронные пушки (до 300 кВт) работают в условиях высоковольтного тлеющего разряда (постоянный проток газа) и имеют холодный катод. Они долговечны и не требуют высокого вакуума.
2. Сильноточные релятивистские электронные пучки – токи до нескольких миллионов ампер; энергия электронов – вблизи энергии покоя электрона $mc^2 = 5,11 \cdot 10^5$ эВ; плотность тока $j = 10^8$ А/см².
3. Плотность тока автоэлектронной эмиссии определяется величиной напряженности электрического поля E и постоянными A и B , которые зависят от свойств материала катода: $j = AE^2 \exp(-B/E)$.

2.

Формирование электронного потока

Варианты ответа Да Нет

1. В случае диодов с взрывоэмиссионными катодами эмиттером является фронт плазмы, движущейся к аноду.
2. Покидая катод, термоэлектроны имеют энергии в несколько десятков эВ.
3. При переходе электронного пучка, движущегося со скоростью V_1 под углом α к границе раздела, из области пространства с потенциалом U_1 в область с потенциалом U_2 сохраняется тангенциальная скорость электронного потока: $V_1 \sin \alpha = V_2 \sin \beta$, где β – угол преломления или $\sin \beta / \sin \alpha = \sqrt{(U_2 - U_0)/(U_1 - U_0)}$ (закон Снеллиуса); $\sqrt{U - U_0}$ эквивалент показателя преломления в геометрической оптике.

Тема (раздел): Управление параметрами электронного потока

Вопросы для контроля:

1.

Управление потоком электронов

Варианты ответа Да Нет

1. Уравнение движения электрона в однородном электрическом поле E под действием силы $F_y = -eE$ имеет вид: $y = V_{0y} t - eE/(2m_e) t^2$; $x = V_{0x} t$.
2. Электрон в однородном магнитном поле B под действием силы Ампера $F = i l B \sin \alpha = e[V_0 B]$ движется по окружности, радиус которой можно определить из равенства центростремительной силы meV_0^2/R и силы F : $R = meV_0/eB$, вращаясь с циклотронной частотой $\omega = eV_0/me$.
3. Сила со стороны электрического поля совершает над электроном работу, ускоряя его; магнитная сила работы не совершает – она только изменяет направление движения электрона.

2.

Электронные линзы

Варианты ответа Да Нет

1. Электронные линзы имеют аксиально-симметричные электрические и магнитные поля.
2. Фокусное расстояние электростатической линзы-диафрагмы приближенно можно определить по формуле: $f = (E_2 - E_1)/(4U_2)$, где $E_1 = U_2/d_1$, $E_2 = (U_3 - U_2)/d_2$ – напряженности электрического поля слева и справа от диафрагмы.

3. Фокусное расстояние электронных линз связано с расстоянием от средней плоскости линзы до объектива l_1 и изображения l_2 выражением: $f_1/l_1 + f_2/l_2 = 1$.

Тема (раздел): Преобразование энергии электронного потока в другие виды энергии
Вопросы для контроля:

1.

Преобразование энергии плазменного потока

Варианты ответа Да Нет

1. В магнитогидродинамических (МГД) генераторах поток плазмы движется по-перек магнитного поля со скоростью V . Фарадеевский ток, генерируемый в МГД-потоке, направлен перпендикулярно как к вектору скорости потока, так и к вектору магнитной индукции B .

2. Эффект Холла состоит в появлении ЭДС Холла, направленной по потоку плазмы, из-за дрейфа электронов (если циклотронная частота много меньше частоты столкновений) в скрещенных магнитном и фарадеевском электрическом полях.

3. ЭДС, генерируемая в МГД-генераторе, $E = e[VB]$. На единицу длины проводника с током I , находящегося в поперечном магнитном поле B , действует сила Ампера $F = [IB]$, которая тормозит поток и преобразует его кинетическую энергию в энергию электрического тока.

2.

Прямое преобразование энергии плазменного потока в СВЧ-излучение

Варианты ответа Да Нет

1. В плазменном электромагнитном генераторе (СВЧ-генераторе) по плазме протекают СВЧ-токи, взаимодействующие с поперечным магнитным полем. Вследствие этого происходит торможение (бесстолкновительное относительно парных столкновений) плазменного потока (преобразование энергии).

2. Электрическое поле E , определяющее скорость движения ионов, намного превышающую скорость дрейфа электронов, имеет поляризационную природу.

3. Характерная частота колебаний в плазменном электромагнитном генераторе определяется собственными плазменными колебаниями ионов ω_i и электронов ω_e и электронной циклотронной частотой ω_e : $\omega^2 = \omega_i^2 [1 + (\omega_e^2 / \omega_{Be}^2)]$.

Тема (раздел): Ионизованный газ и плазма

Вопросы для контроля:

1.

Плазма – четвертое состояние вещества

Варианты ответа Да Нет

1. Плазма (полностью ионизованная) – квазинейтральная среда заряженных частиц, характерные размеры которой много больше дебаевского радиуса $r_D = \sqrt{T/(4\pi n e^2)}$, где T – температура плазмы, n – концентрация заряженных частиц, e – заряд электрона.

2. Для плазмы характерны: парное кулоновское взаимодействие между частицами, коллективные эффекты (согласованное движение частиц) – взаимодействия через электромагнитные поля колебаний и взаимодействие посредством сил Ван-дер-Ваальса.

3. Разделение зарядов в плазме, например слой у диэлектрической стенки, приводит к появлению электрического поля E и пех; при этом потенциал изменяется как $\varphi = \varphi_0 \exp(-x/r_D)$, где x – размер области электрического поля; $x \gg r_D$.

2.

Плазма. Модели равновесия

Варианты ответа Да Нет

1. Полное термодинамическое равновесие – при котором скорости прямого и обратного процессов одинаковы для каждого из элементарных процессов.
2. Ионизационное равновесие – стационарное состояние по плотности электронов, ионов и атомов: $(dn_e)/dt = n_e n_a \langle \sigma V \rangle + \beta n_e^2 n_i + \mu n_a + \gamma n_e n_i \equiv 0$, где $\langle \sigma V \rangle$ – полное сечение ионизации, β – постоянная скорости рекомбинации при электрон-ионных столкновениях, μ – скорость фотоионизации, γ – коэффициент фоторекомбинации.
3. При корональном равновесии процесс ионизации электронным ударом уравнивается обратным процессом фоторекомбинации $(dn_e)/dt = n_e n_a \langle \sigma V \rangle - \gamma n_e n_i$ и степень ионизации плазмы $\alpha = n_i/n_a = \langle \sigma V \rangle / \gamma$ растет при увеличении концентрации нейтральных атомов n_a (γ – коэффициент фоторекомбинации; $\langle \sigma V \rangle$ – полное сечение ионизации).

Тема (раздел): Общие свойства плазмы

Вопросы для контроля:

1.

Явления переноса в плазме

Варианты ответа Да Нет

1. Явления переноса: диффузия, теплопроводность, электропроводность. При постоянном электронном токе в плазме устанавливается равновесие между силой со стороны внешнего электрического поля E и силой трения электронов об ионы: $-eE = m_e V_{ei}$, где V – направленная скорость электрона; e_i – частота столкновений электронов и ионов; e , m_e – заряд и масса электрона.
2. Электропроводность плазмы определяется концентрацией электронов n , массой и зарядом электронов m_e , e и временем между столкновениями $1/e_i$:
 $\sigma = (ne^2/m_e) (1/e_i)$.
3. Электропроводность полностью ионизованной плазмы не зависит от концентрации, а определяется температурой электронов T_e : $\sigma = 10^7 (T_e)^{3/2}$, с-1 (T_e – в градусах).

2.

Явления переноса в плазме

Варианты ответа Да Нет

1. Удельное сопротивление меди $\rho_m \approx 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом м; для плазмы с температурой 2 эВ $\rho_{пл} \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$ Ом м; при температуре плазмы 100 эВ $\rho_{пл} \approx 5 \cdot 10^{-1}$ Ом м.
2. В приближении идеальной проводимости электрическое поле E^* в системе координат, связанной с плазмой, равно нулю: $E^* = E + 1/c [VH] = 0$ или $E = -1/c [V_{\perp} H]$, где $V_{\perp}$ – скорость перпендикулярного относительно магнитного поля движения плазмы; H – величина напряженности магнитного поля, c – скорость света. $V_{\perp}$ – скорость электрического дрейфа плазмы: $V_{\perp} = c [EH]/H^2$.
3. Закон Ома в идеальной плазме имеет вид: $j = \sigma (E - 1/c [VH])$.

Критерии оценивания.

Критерии оценки: зачтено – если процент правильных ответов превышает 50% (50% и менее – не зачет).

6.2 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

6.2.1 Критерии и средства (методы) оценивания индикаторов достижения компетенции в рамках промежуточной аттестации

Индикатор достижения компетенции	Критерии оценивания	Средства (методы) оценивания промежуточной аттестации
ПКР-9.5	Излагает физические законы, на основе которых построены электровакуумные и плазменные элементы, определяет назначение и функциональные связи между элементами в устройствах базового технологического оборудования, применяемого в производстве материалов, компонентов нано- и микросистемной техники.	Устное собеседование по теоретическим вопросам на экзамене и выполнение практических заданий.

6.2.2 Типовые оценочные средства промежуточной аттестации

6.2.2.1 Семестр 7, Типовые оценочные средства для проведения экзамена по дисциплине

6.2.2.1.1 Описание процедуры

Описание процедуры экзамена:
устное собеседование на экзамене по теоретическим вопросам.

Пример задания:

Образец экзаменационного билета

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Институт высоких технологий
Кафедра радиоэлектроники и телекоммуникационных систем

Дисциплина: «Вакуумная и плазменная электроника»

Экзаменационный билет № 3

1. Методы ускорения плазменных потоков.
2. Термоэлектронная эмиссия. Эффект Ричардсона.

Билет составил профессор кафедры РЭиТС

РЭиТС
15 декабря 2025 г.
А.Г.

Утверждаю:
Заведующий кафедрой

Ченский
20 декабря 2025 г.

Вопросы, темы для подготовки к экзамену:
1. Вакуумная и плазменная электроника – история развития.

2. Основы электронной теории твердого тела. Электрические свойства твердых тел.
3. Термоэлектронная эмиссия. Эффект Ричардсона.
4. Автоэлектронная эмиссия. Вакуумный пробой.
5. Взрывная эмиссия. Эктоны.
6. Вторично-электронная эмиссия.
7. Фотоэлектронная эмиссия. Внешний и внутренний фотоэффекты.
8. Способы формирования электронных потоков различной интенсивности. Электронная пушка Пирса.
9. Транспортировка электронного потока. Способы ограничения его поперечных размеров.
10. Общая характеристика вакуумных насосов низкого и высокого вакуума.
11. Электрический способ управления плотностью и скоростью электронных потоков. Движение электрона в однородном электрическом поле.
12. Магнетроны.
13. Вакуум. Сорбционные явления в вакууме.
14. Электронные линзы: одиночная, иммерсионная.
15. Датчики «вакуума». Механические, электрические и магнитные преобразователи.
16. Взаимодействие электронов с твердыми телами: катодolumинесценция, рентгеновское излучение.
17. Вакуум. Режимы течения газа.
18. Ионизованный газ и плазма. Определение. Основные характеристики.
19. Элементарные процессы в плазме: ионизация, перезарядка.
20. Основные методы генерации плазмы.
21. Магнитогидродинамические генераторы.
22. Типы газовых разрядов. Тлеющий разряд.
23. Явления переноса в плазме.
24. Плазма в магнитном поле.
25. Колебания плазмы.
26. Неустойчивости плазмы.
27. Излучение плазмы.
28. Методы ускорения плазменных потоков.
29. Диагностика параметров плазмы.
30. Ионная откачка. Криосорбционная откачка.
31. Основы электронной теории твердого тела. Электронная теория проводимости.
32. Термоэлектронная эмиссия. Эффект Шоттки. Закон « $3/2$ ».
33. Фотоэлектронная эмиссия из полупроводников.
34. Виброэлектронная эмиссия, криогенная электронная эмиссия.
35. Параметры и характеристики термодатодов.
36. Магнитный способ управления электронным потоком. Движение электрона в однородном магнитном поле.
37. Магнитные линзы.
38. Фотоэлектронный умножитель.
39. Канальный умножитель. Микроканальная пластина.
40. Клистроны.
41. Тормозное, рентгеновское излучение.
42. Типы газовых разрядов. Дуговой разряд.
43. Пробой газа. Кривые Пашена.

6.2.2.1.2 Критерии оценивания

Отлично	Хорошо	Удовлетворительно	Неудовлетворительно
Излагает физические законы, на основе которых построены электровакуумные и плазменные элементы, определяет назначение и функциональные связи между элементами в устройствах базового технологического оборудования, применяемого в производстве материалов, компонентов нано- и микросистемной техники.	Допускает незначительные ошибки при изложении физических законов, на основе которых построены электровакуумные и плазменные элементы, при определении назначения и функциональных связей между элементами в устройствах базового технологического оборудования, применяемого в производстве материалов, компонентов нано- и микросистемной техники.	Допускает существенные ошибки при изложении физических законов, на основе которых построены электровакуумные и плазменные элементы, при определении назначения и функциональных связей между элементами в устройствах базового технологического оборудования, применяемого в производстве материалов, компонентов нано- и микросистемной техники.	Допускает принципиальные ошибки при изложении физических законов, на основе которых построены электровакуумные и плазменные элементы, при определении назначения и функциональных связей между элементами в устройствах базового технологического оборудования, применяемого в производстве материалов, компонентов нано- и микросистемной техники; или демонстрирует незнание ответов на вопросы билета.

7 Основная учебная литература

1. Трубочкина Н.К. Наноэлектроника и схемотехника [Электронный ресурс]: учебник для академического бакалавриата: в 2 ч. Ч. 2, 2018. 250 с.
<http://www.biblio-online.ru/book/035AAF79-5C5F-4AAF-B4FE-F71CB05A08C8?>
2. Щепетов А.Г. Основы проектирования приборов и систем [Электронный ресурс]: учебник и практикум для академического бакалавриата / А.Г. Щепетов, 2018. 458 с.
<http://www.biblio-online.ru/book/3E67C631-D1A8-45C9-AF5A-DFAD0D967E00?>
3. Трубочкина Н.К. Наноэлектроника и схемотехника [Электронный ресурс]: учебник для академического бакалавриата: 2 ч. Ч. 1, 2018. 269 с.
<http://www.biblio-online.ru/book/5C192121-0891-4D41-B892-C28E94681142?>
4. Щука А.А. Электроника [Электронный ресурс]: учебник для академического бакалавриата: в 4 ч. Ч. 1: Вакуумная и плазменная электроника, 2018. 174 с.
<http://www.biblio-online.ru/book/D783AAEC-D443-4195-A85E-D702FC427417?>

8 Дополнительная учебная литература и справочная

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда: монография / Ю.П. Райзер, 2009. 734 с.
<http://www.biblio-online.ru/book/D783AAEC-D443-4195-A85E-D702FC427417?>
2. Фурсей Г.Н. Автоэлектронная эмиссия: учебник / Г.Н. Фурсей, 2012. 319 с.

<http://www.biblio-online.ru/book/D783AAEC-D443-4195-A85E-D702FC427417?>

3. Каганов В.И. Компьютерные вычисления в средах Excel и Mathcad: монография / В.И. Каганов, 2015. 325 с. <http://www.biblio-online.ru/book/D783AAEC-D443-4195-A85E-D702FC427417>

9 Ресурсы сети Интернет

1. <http://library.istu.edu/>
2. <https://e.lanbook.com/>

10 Профессиональные базы данных

1. <http://new.fips.ru/>
2. <http://www1.fips.ru/>

11 Перечень информационных технологий, лицензионных и свободно распространяемых специализированных программных средств, информационных справочных систем

1. Лицензионное программное обеспечение Системное программное обеспечение
2. Лицензионное программное обеспечение Пакет прикладных офисных программ
3. Лицензионное программное обеспечение Интернет-браузер

12 Материально-техническое обеспечение дисциплины

1. Учебная аудитория для проведения лекционных занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации. Оснащение: комплект учебной мебели, рабочее место преподавателя, доска. Мультимедийное оборудование (в том числе переносное): мультимедийный проектор, экран, акустическая система, компьютер с выходом в интернет.
2. Учебная аудитория для проведения лабораторных/практических (семинарских) занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации. Оснащение: комплект учебной мебели, рабочее место преподавателя, доска. Мультимедийное оборудование (в том числе переносное): мультимедийный проектор, экран, акустическая система, компьютер с выходом в интернет.