

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»  
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет  
Кафедра физики плазмы**



УТВЕРЖДАЮ  
Декан ФФ  
А. Е. Бондарь  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

академик РАН \_\_\_\_\_

**Рабочая программа дисциплины**

**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА И ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД**

направление подготовки: **03.04.02 Физика. Курс 1, семестр 1**  
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения  
**Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётных единицы, из них: - контактная работа 36 часов - в интерактивной форме 16 часов										
Компетенции ПК-1, ПК-2										

Разработчик:

к.ф.-м.н.

И. о. зав. КФПл ФФ НГУ

к.ф.-м.н.

Руководитель программы

д.ф.-м.н.

Т.Д. Ахметов

А.Д. Беклемишев

И. Б. Логашенко

Новосибирск, 2020

## Содержание

<b>Аннотация</b> .....	3
1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. ....	4
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы. ....	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу. ....	5
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий. ....	5
5. Перечень учебной литературы. ....	8
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. ....	8
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.....	8
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. ....	9
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	9
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. ....	9

## Аннотация

к рабочей программе дисциплины «Низкотемпературная плазма и газовый разряд»

Направление: **03.04.02 Физика**

**Направленность (профиль): Общая и фундаментальная физика**

Программа дисциплины «Низкотемпературная плазма и газовый разряд» составлена в соответствии с требованиями СУОС к уровню магистратуры по направлению подготовки **03.04.02 Физика, направленность «Общая и фундаментальная физика»**, а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется на физическом факультете Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ) кафедрой физики плазмы, в качестве дисциплины по выбору. Дисциплина изучается студентами первого курса магистратуры физического факультета в осеннем семестре.

Цель курса – познакомить студентов с физикой процессов, протекающих в низкотемпературной плазме, с различными типами газовых разрядов и их применений в науке и технике.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника профессиональных компетенций:

**ПК-1 – способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта.**

**ПК-2 - способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности.**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **Знать:** методы и способы постановки и решения задач физических исследований в области физики низкотемпературной плазмы, возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований.
- **Уметь:** применять изученные модели и методы для нахождения решения простых задач по физике низкотемпературной плазмы.
- **Владеть:** навыками самостоятельной работы с учебной литературой по физике низкотемпературной плазмы и газовому разряду; основной терминологией и понятийным аппаратом физики низкотемпературной плазмы; уметь оценить свойства плазмы по её основным параметрам.

Курс рассчитан на один семестр. Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, консультации, самостоятельная работа студента, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: контроль посещения лекций и практических занятий, решение задач

Промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет **72** академических часа / **2** зачетных единицы.

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

Дисциплина «Низкотемпературная плазма и газовый разряд» разработана для изучения магистрантами-физиками с целью подробного ознакомления с понятиями и явлениями физики плазмы, со свойствами плазмы, с теоретическими моделями, используемыми для описания плазмы, с практическими применениями низкотемпературной плазмы и газового разряда. Курс служит основой для подготовки специалистов в области физики плазмы.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника профессиональных компетенций:

**ПК-1 – способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта.**

**ПК-2 - способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности.**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **Знать:** методы и способы постановки и решения задач физических исследований в области физики низкотемпературной плазмы, возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований (ПК 1.1).
- **Уметь:** применять изученные модели и методы для нахождения решения простых задач по физике низкотемпературной плазмы (ПК 2.2).
- **Владеть:** навыками самостоятельной работы с учебной литературой по физике низкотемпературной плазмы и газовому разряду; основной терминологией и понятийным аппаратом физики низкотемпературной плазмы; уметь оценить свойства плазмы по её основным параметрам (ПК 2.3).

## **2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.**

Дисциплина «Низкотемпературная плазма и газовый разряд» реализуется в осеннем семестре для студентов 1-го магистратуры, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой физики плазмы. Для его восприятия требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим дисциплинам как классическая механика, электродинамика, статистическая физика, физика сплошных сред, основы физики плазмы. Курс должен предшествовать выполнению квалификационной работы студента по данной специализации, так как дает ему необходимые знания, навыки и предоставляет инструменты для выполнения научных исследований в рамках подготовки его квалификационной работы.

**3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётных единицы, из них: - контактная работа 36 часов - в интерактивной форме 16 часов										
Компетенции ПК-1, ПК-2										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, консультации, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, экзаменов.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: контроль посещения лекций и практических занятий, решение задач

- промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 16 часов;
- практические занятия – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 22 часа;

Объем контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, групповые консультации, экзамен) составляет 36 часов.

Работа с обучающимися в интерактивных формах (практические занятия) составляет 16 часов.

**4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий.**

Дисциплина «Низкотемпературная плазма и газовый разряд» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 1-м курсе магистратуры физического факультета НГУ в первом

семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетных единицы, 72 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)					Консультации перед экзаменом (часов)	Промежуточная аттестация (в период сессии) (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции	Практические занятия				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Столкновительные и излучательные процессы в плазме.	1-4	12	4	4	4			
2	Теория пробоя газа. Разряд в постоянном поле. Явления на поверхностях	5-8	12	4	4	4			
3	Источники ионов, генераторы плазмы	8-11	12	4	4	4			
4	Разряды в переменных полях	12-14	9	3	3	3			
5	Некоторые технологические применения низкотемпературной плазмы	15-16	5	1	1	3			
	Групповая консультация		2					2	
6	Подготовка к экзамену		18				18		
7	Экзамен		2						2
<b>Всего</b>			<b>72</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>2</b>	<b>2</b>

### Программа и основное содержание лекций (16 часов)

1. **Столкновительные и излучательные процессы в плазме. (4 часа)**  
Элементарные явления в плазме. Столкновения заряженных и нейтральных частиц в плазме.
2. **Теория пробоя газа. Разряд в постоянном поле. Явления на поверхностях. (4 часа)**  
Движение электронов в газе. Пробой в газе. Параметр подобия. Развитие электронной лавины. Коэффициенты Таунсенда. Условие зажигания самостоятельного разряда. Кривая Пашена. Термоэлектронная эмиссия, закон Ричардсона-Дешмана. Фотоэлектронная эмиссия. Вольтамперная характеристика разряда. Дуговой разряд. Катодные пятна. Автоэлектронная эмиссия.
3. **Источники ионов, генераторы плазмы. (4 часа)**  
Инжекторы мощных пучков быстрых атомов для магнитных ловушек. Источник ионов. Закон Чайлда-Ленгмюра. Перезарядная мишень. Ионный состав пучка. Дуговые и высокочастотные источники ионов. Элементы ионной оптики. Баллистическая фокусировка. Образование и разрушение отрицательных ионов. Нейтрализаторы для пучков отрицательных ионов. Объемный и поверхностно-плазменный механизмы генерации отрицательных ионов. Источники отрицательных ионов. Магнитный фильтр. Влияние добавки цезия.
4. **Разряды в переменных полях. (3 часа)**  
Высокочастотные разряды и источники плазмы. Емкостной разряд. Индуктивный разряд. Оптический пробой газа. Эмпирические данные.
5. **Некоторые технологические применения низкотемпературной плазмы. (1 час)**  
Плазма паров щелочных металлов. Обеспечение проводимости. Технологические источники ионов. Ионные двигатели.

#### **Программа практических занятий (16 часов)**

1. **Столкновительные и излучательные процессы в плазме. (4 часа)**  
Упругие соударения. Возбуждение. Ионизация. Перезарядка. Рекомбинация. Функция распределения электронов и процессы переноса.
2. **Теория пробоя газа. Разряд в постоянном поле. Явления на поверхностях. (4 часа)**  
Влияние магнитного поля. Пеннинговский разряд. Магнетрон. Планотрон. Установившийся ток в газе. Тлеющий разряд. Структура разряда, положительный столб, катодный слой. Полюый катод. Высоковольтный вакуумный пробой. Взрывная эмиссия. Гипотеза Кронберга. Энерговыведение пробоя. Пробой и разряд в газе высокого давления. Коронный разряд. Стримеры. Молния. Шаровая молния.
3. **Источники ионов, генераторы плазмы. (4 часа)**  
Инжекторы отрицательных ионов для термоядерных установок. Источники многозарядных ионов. Плазма газовых лазеров. Условие лазерной генерации. Создание инверсии населенностей в газовом разряде. Создание предварительной плазмы в магнитных ловушках. Плазменные пушки для открытых ловушек. Пробой газа в токамаке.
4. **Разряды в переменных полях. (3 часа)**  
Механизм оптического пробоя. Развитие электронной лавины. Пороговая напряженность поля. Непрерывный оптический разряд. СВЧ разряд.
5. **Некоторые технологические применения низкотемпературной плазмы. (1 час)**  
Поверхностная ионизация. Термоэмиссионные преобразователи. МГД генераторы. Холловский ток.

#### **Самостоятельная работа студентов (36 часов)**

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	9
Изучение материала лекций	9
Подготовка к экзамену	18

## **5. Перечень учебной литературы.**

### **5.1. Основная литература**

1. Б.А. Князев, Низкотемпературная плазма и газовый разряд: Учебное пособие. Новосибирский гос. ун-т. Новосибирск, 2003, 290 с.
2. Ю.П. Райзер, Физика газового разряда, М.: Наука, 1992, 536 с.

### **5.2. Дополнительная литература**

1. Б.М. Смирнов, Физика слабоионизованного газа: В задачах с решениями, М.: Наука, 1985, 424 с.
2. К. Барнет, М. Харрисон, Прикладная физика атомных столкновений. Плазма. М.: Энергоатомиздат, 1987. 432 с.
3. Я. Браун, ред., Физика и технология источников ионов, М.: Мир, 1998. 496 с.
4. Н.Н. Семашко, А.Н. Владимиров, В.В. Кузнецов и др. Инжекторы быстрых атомов водорода. М.: Энергоиздат, 1981. 168 с.
5. О. Звелто, Принципы лазеров. СПб.: Издательство «Лань», 2008. 720 с.

## **6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.**

1. M.A. Lieberman, A.J. Lichtenberg, Principles of plasma discharges and materials processing. New York: John Wiley & Sons Inc., 2005. 757 p.
2. F.F. Chen, J.P. Chang, Principles of plasma processing: Lecture notes. Plenum/Kluwer publishers, 2002, 208 p.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.**

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

### **7.1 Современные профессиональные базы данных**

Не используются.

### **7.2. Информационные справочные системы**

Не используются.

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

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

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.**

### **10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

#### ***Текущий контроль***

Текущий контроль осуществляется путем опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции, а также проведения коротких самостоятельных работ в начале каждого практического занятия с решением типовых задач, разобранных на предыдущем занятии.

#### ***Промежуточная аттестация***

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленные компетенции ПК-1 и ПК-2 сформированы не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области низкотемпературной плазмы и газового разряда в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенций ПК-1 и ПК-2.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

### Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Низкотемпературная плазма и газовый разряд».

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 2.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 2.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

### Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

#### Примеры задач

*Задача 1.* Сделать численные оценки, возможен ли самостоятельный разряд в промежутке длиной  $d = 1$  см между медными электродами при давлении неона 5 торр и разности потенциалов 400 В. (1 час)

**Задача 2.** Оценить максимальный ток ионов для инжектора нейтральных атомов дейтерия, который можно извлечь из холодной плазмы с помощью сеточной системы, состоящей из плоских электродов диаметром  $D=300$  мм с прозрачностью  $k=50\%$ , расстоянием между ними  $d=3$  мм и разностью потенциалов  $U=30$  кВ. **(1 час)**

**Задача 3.** Оценить «выход» (отношение тока атомов к току исходного ионного пучка) пучка нейтральных атомов водорода из пучка протонов с энергией  $50$  кэВ после прохождения водородной газовой мишени длиной  $50$  см с давлением  $1$  мторр. Можно ли сделать выход больше (если да, то во сколько раз)? **(2 час)**

**Задача 4.** Вычислить частоту ионизации аргона по модели Томсона для максвелловской функции распределения электронов с  $T_e = 3$  эВ при давлении  $p = 10$  мторр и  $T = 300$  К. **(2 час)**

**Задача 5.** Найти максимальную скорость электронов, вылетающих из медного катода, на который падает излучение с длиной волны  $200$  нм. Оценить фототок с  $1$  см<sup>2</sup> пластины, если интенсивность света равна  $1$  Вт/см<sup>2</sup>. Считать, что всё падающее излучение поглощается медной пластинкой. Квантовый выход электронов из меди для излучения с длиной волны  $200$  нм составляет  $Y \approx 1 \cdot 10^{-3}$  электронов/фотон. **(1 час)**

**Задача 6.** Измерение показало, что плавающий потенциал зонда в аргоновой плазме составил  $U_{\text{п}} = -50$  В. Оценить ионный ток насыщения на плоский зонд площадью  $S = 0.2$  см<sup>2</sup>, если плотность плазмы равна  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>. **(1 час)**

**Задача 7.** Вычислить скорость дрейфа электронов в водороде при давлении  $p = 50$  мторр,  $T=300$  К, в постоянном электрическом поле  $E = 1$  В/см. Справедливо ли при таких параметрах приближение Лоренца для функции распределения электронов? **(2 час)**

**Задача 8.** Оценить температуру электронов в аргоне с давлением  $0.1$  торр в постоянном электрическом поле  $E = 0.4$  В/см **(1 час)**

**Задача 9.** Оценить температуру электронов в азоте с давлением  $0.1$  торр в переменном электрическом поле с амплитудой  $E_0 = 0.1$  В/см с частотой  $f = 13.6$  МГц. Справедливо ли при таких параметрах приближение Лоренца для функции распределения электронов? **(1 час)**

**Задача 10.** Круглый плоский катод из гексаборида лантана ( $\text{LaB}_6$ ) диаметром  $D = 20$  мм нагрет до температуры  $T = 1650$  °С. На расстоянии  $d = 10$  мм параллельно катоду расположен плоский сеточный анод. Между катодом и анодом прикладывается разность потенциалов  $U = 2$  кВ. Найти ток между катодом и анодом. **(1 час)**

**Задача 11.** При каком условии можно пренебречь диффузионными потерями по сравнению с рекомбинацией в положительном столбе тлеющего разряда (модель Шоттки). Привести количественный критерий с численными оценками. Сделать оценки для разряда в трубке радиусом  $R = 1$  см для аргона при  $T_e = 2$  эВ,  $p = 1$  торр,  $T = 300$  К. **(1 час)**

**Задача 12.** Привести количественный критерий, когда можно пренебречь потерями электронов при рекомбинации по сравнению с амбиполярной диффузией (модель Шоттки). Сделать расчет для разряда в трубке радиусом  $R = 1$  см для гелия при  $T_e = 4$  эВ,  $p = 5$  торр,  $T = 300$  К. **(1 час)**

**Задача 13.** Оценить длину свободного пробега электронов по отношению к упругим столкновениям в водороде при давлении  $p = 50$  мторр в электрическом поле  $E = 1$  В/см. **(1 час)**

### Вопросы, выносимые на экзамен

*На проверку сформированности компетенции ПК-1:*

1. Упругие столкновения частиц в плазме. Перезарядка. Типичные величины сечений.
2. Столкновения частиц в плазме. Возбуждение. Ионизация. Формула Томсона. Типичные величины сечений.
3. Движение электронов в газе в постоянном электрическом поле. Параметр подобия.
4. Развитие электронной лавины. Коэффициенты Таунсенда. Условие зажигания самостоятельного разряда.
5. Условие зажигания самостоятельного разряда. Кривая Пашена. Термоэлектронная эмиссия, закон Ричардсона-Дешмана.

6. Оптический пробой газа. Эмпирические данные. Механизм оптического пробоя. Развитие электронной лавины. Пороговая напряженность поля.
7. Установившийся ток в газе. Тлеющий разряд. Структура разряда, положительный столб, катодный слой. Фотоэлектронная эмиссия.
8. Автоэлектронная эмиссия. Взрывная эмиссия. Высоковольтный вакуумный пробой.
9. Пробой и разряд в газе высокого давления. Коронный разряд. Стримеры.

*На проверку сформированности компетенции ПК-2:*

1. Дуговой разряд. Катодные пятна.
2. Высокочастотные разряды и источники плазмы. Емкостной высокочастотный разряд.
3. Инжекторы нейтральных атомов. Основные элементы инжектора. Закон Чайлда — Ленгмюра (степени трех вторых). Равновесный выход нейтральных атомов из газового нейтрализатора.
4. Устройство и принцип работы магнетрона и планотрона.
5. Образование и разрушение отрицательных ионов. Объемный и поверхностно-плазменный механизмы генерации отрицательных ионов.
6. Нейтрализация отрицательных ионов в газе и плазме в зависимости от энергии. Фотонный нейтрализатор.
7. Плазма газовых лазеров. Условие лазерной генерации. Создание инверсии населенностей в газовом разряде.
8. Создание предварительной плазмы в магнитных ловушках. Плазменные пушки для открытых ловушек. Пробой газа в токамаке.
9. Пеннинговский разряд.

**Пример экзаменационного билета**

1. Упругие столкновения частиц в плазме. Перезарядка. Типичные величины сечений.
2. Дуговой разряд. Катодные пятна.

Форма экзаменационного билета представлена на рисунке

<p><b>МИНОБРНАУКИ РОССИИ</b></p> <p><i>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)</i></p> <p><b>Физический факультет</b></p>
<p><b>ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № _____</b></p> <p>1. .... 2. ....</p> <p>Составитель _____ /Ф.И.О. преподавателя/ (подпись)</p> <p>« ____ » _____ 20 ____ г.</p>

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации фонда оценочных средств  
по дисциплине «Низкотемпературная плазма и газовый разряд»  
по направлению подготовки 03.04.02 Физика  
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного

