**Федеральное государственное бюджетное образовательное**

**учреждение высшего образования**

**Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова**

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

УТВЕРЖДАЮ

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/ /

«\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_20 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

Наименование дисциплины:

**Элементарные процессы в плазме**

Уровень высшего образования:

**Специалитет**

Специальность:

**03.05.02 Фундаментальная и прикладная физика**

Направленность (профиль)/специализация образовательной программы:

Физическая электроника

Форма обучения:

Очная

Москва 20\_\_

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по специальности 03.05.02 «Фундаментальная и прикладная физика», утвержденным приказом МГУ от 21.12.2018 г. № 1780.

Год (годы) приема на обучение \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**Авторы–составители:**

1. Инженер Корнев Константин Николаевич, кафедра физической электроники физического факультета МГУ

Заведующий кафедрой

Доктор физико-математических наук, профессор Черныш Владимир Савельевич, заведующий кафедрой физической электроники

**Аннотация к рабочей программе дисциплины**

В курсе лекций рассматриваются основополагающие понятия и характеристики парных и тройных взаимодействий частиц в ионизованном газе. Кратко излагаются основные вопросы, связанные с упругим взаимодействием электронов с атомами и молекулами. Рассматриваются также неупругие процессы возбуждения и ионизации частиц электронным ударом. Даются основные сведения о классических и квантово-механических методах вычисления эффективных сечений взаимодействий частиц в ионизованном газе. Рассматриваются экспериментальные методы измерения эффективных дифференциальных сечений, общих и суммарных сечений, констант скоростей парных и тройных взаимодействий. Приводится сравнение вычисленных различными методами эффективных сечений взаимодействий частиц с экспериментальными данными. Рассматриваются процессы ионизации и исчезновения заряженных частиц в неравновесной плазме. Диффузионные потери заряженных частиц. Свободная и амбиполярная диффузии. Электрон-ионная рекомбинация (диссоциативная, трехчастичная, радиационная). Прилипание электронов (диссоциативное, трехчастичное). Разрушение отрицательных ионов (ассоциативный отрыв электрона, разрушение отрицательного иона электронным ударом, процессы отрыва электрона при столкновении с возбужденными частицами). Перезарядка. Ион-ионная рекомбинация.

**1. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Вариативная часть, по выбору

**2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия**

Не установлены

**3. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Код и наименование компетенции** | **Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции** | **Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с индикаторами достижения компетенций** |
|  |  | Знать физические основы описания элементарных процессов, протекающих в ионизованном газе;Уметь использовать классические и квантово-механические методы вычисления эффективных сечений взаимодействий частиц в ионизованном газе;Владеть экспериментальными методами определения сечений взаимодействий различных заряженных и нейтральных частиц. |

**4.** Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., в том числе: 34 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 38 академических часа, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

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

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),****Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)** | **Всего****(ак.ч.)** | **В том числе** | **Форма текущего контроля успеваемости, наименование** |
| **Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем)*****Виды контактной работы, академические часы[[1]](#footnote-1)*** | **Самостоятельная работа обучающегося,****академические часы** |
| **Занятия лекционного типа (лекции)** | **Занятия семинарского типа** | **Всего** |
| **Семинары** | **Лабораторные занятия\*** | **Практические занятия\*** |
| Введение. Неколлективные или элементарные процессы. Коллективные или макропроцессы. Основные понятия и общие соотношения физики электронных и атомных взаимодействий. Определение понятия взаимодействия. Радиус взаимодействия и прицельное расстояние. Законы сохранения при парных соударениях. Эффективные сечения парных взаимодействий. | **4** | **2** |  |  |  | **2** | **2** | Опрос, |
| Дифференциальное эффективное сечение рассеяния. Суммарное или макроскопическое эффективное сечение. Вероятность столкновений. Общее полное и общее суммарное эффективное сечение. | **4** | **2** |  |  |  | **2** | **2** | Опрос, проверка домашних заданий,  |
| Средняя длина свободного пробега и частота по отношению к элементарному взаимодействию. Константа скорости реакции. Скорость реакции. Сечение передачи импульса. Эффективная частота соударений. | **4** | **2** |  |  |  | **2** | **2** | Проверка домашних заданий, Контрольная работа |
| Тройные взаимодействия. Дифференциальное эффективное сечение тройных взаимодействий. Прямые и обратные процессы. Вероятность прямого и обратного процессов. Принцип детального равновесия. | **4** | **2** |  |  |  | **2** | **2** | Опрос, проверка домашних заданий, |
| Классический метод вычисления эффективных сечений и условия его применимости. Движение взаимодействующих частиц в поле центральных сил. Вычисление дифференциальных эффективных сечений рассеяния в заданном направлении и в единичный телесный угол. Вычисление полного эффективного сечения. | **4** | **2** |  |  |  | **2** | **2** | Опрос, проверка домашних заданий, |
| Соударения идеально упругих шаров. Упругие взаимодействия частиц. Эффект Рамзауэра-Таундсенда. Траектория движущейся частицы в поле рассеивающего центра. Эффективное сечение упругого рассеяния двух заряженных частиц. Формула Резерфорда. | **4** | **2** |  |  |  | **2** | **2** | Опрос, проверка домашних заданий, |
| Неупругие соударения первого и второго рода. Дифференциальные эффективные сечения ионизации и возбуждения атомов и молекул. Тройные дифференциальные эффективные сечения ионизации и их угловое распределение. Двойное дифференциальные эффективные сечения ионизации. Полное эффективное сечение ионизации. | **4** | **2** |  |  |  | **2** | **2** | Опрос, проверка домашних заданий, |
| Классические методы вычисления эффективных сечений возбуждения энергетических уровней и ионизации атомов и молекул. Вероятность ионизации. Модель Томсона. Эффективное сечение ионизации по модели Томсона. | **4** | **2** |  |  |  | **2** | **2** | Опрос, проверка домашних заданий, |
| Полуэмпирические и эмпирические формулы для сечения ионизации. Формула Дравина. Формула Гризинского. Дифференциальное и полное эффективное сечение возбуждения уровня атома или молекулы. Прямое возбуждение. Возбуждение с электронным обменом. Эффективные сечения ступенчатых процессов возбуждения и ионизации. | **4** | **2** |  |  |  | **2** | **2** | Проверка домашних заданий, Контрольная работа |
|  Квантово-механические методы вычисления эффективных сечений взаимодействий. Теория возмущений. Волновое уравнение системы сталкивающих частиц. Волновая функция рассеянных электронов. Амплитуда рассеянной волны. | **4** | **2** |  |  |  | **2** | **2** | Опрос, проверка домашних заданий, |
| Борновское приближение и условия его применимости. Упругое рассеяние электронов: рассеяние на малые и большие углы, изотропное и анизотропное рассеяние. Вычисление дифференциальных эффективных сечений возбуждения энергетических уровней и ионизация электронным ударом в борновском приближении.  | **4** | **2** |  |  |  | **2** | **2** | Проверка домашних заданий, Контрольная работа |
| Оптически запрещенные и разрешенные переходы. Угловое распределение неупруго рассеянных электронов. Сравнение предсказаний теории в рамках аппроксимации Борна с экспериментальными результатами углового распределения для упругого и неупругого рассеяния электронов | **4** | **2** |  |  |  | **2** | **2** | Опрос, проверка домашних заданий, |
| Возникновение и исчезновение заряженных частиц в неравновесной плазме. Прямая и ступенчатая ионизации атомов и молекул электронным ударом. Ионизация при столкновении тяжелых частиц. Параметр Месси. Электрон-ионная рекомбинация (диссоциативная, трехчастичная, радиационная). | **4** | **2** |  |  |  | **2** | **2** | Опрос, проверка домашних заданий, |
|  Прилипание электронов (диссоциативное, трехчастичное). Разрушение отрицательных ионов (ассоциативный отрыв электрона, разрушение отрицательного иона электронным ударом, процессы отрыва электрона при столкновении с возбужденными частицами). Перезарядка. Ион-ионная рекомбинация. Диффузионные потери заряженных частиц. Свободная и амбиполярная диффузии. | **8** | **4** |  |  |  | **4** | **4** | Опрос, проверка домашних заданий, |
| Методы измерения сечений парных и тройных взаимодействий. Экспериментальное определение эффективных дифференциальных сечений, общих и суммарных сечений, констант скоростей парных и тройных взаимодействий. | **12** | **4** |  |  |  | **4** | **8** | Проверка домашних заданий, Контрольная работа |
| **Промежуточная аттестация – зачет**  |  |  |  |  |  |  | **8[[2]](#footnote-2)** |  |
| **Итого** | **72** | **34** |  |  |  | **34** | **38**  |  |

\*Лабораторные занятия, практические занятия относятся к практической подготовке обучающихся.

**6. Фонд оценочных средств для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)**

6.1. Типовые задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения:

Перечень вопросов:

* 1. Определение понятия взаимодействия. Радиус взаимодействия и прицельное расстояние.
	2. Законы сохранения при парных соударениях.
	3. Эффективные сечения парных взаимодействий.
	4. Дифференциальное эффективное сечение рассеяния.
	5. Суммарное или макроскопическое эффективное сечение.
	6. Общее полное и общее суммарное эффективное сечение.
	7. Средняя длина свободного пробега и частота по отношению к элементарному взаимодействию.
	8. Константа скорости реакции.
	9. Скорость реакции.
	10. Сечение передачи импульса. Эффективная частота соударений.
	11. Дифференциальное эффективное сечение тройных взаимодействий.
	12. Прямые и обратные процессы. Вероятность прямого и обратного процессов. Принцип детального равновесия.
	13. Классический метод вычисления эффективных сечений и условия его применимости. Движение взаимодействующих частиц в поле центральных сил.
	14. Вычисление дифференциальных эффективных сечений рассеяния в заданном направлении и в единичный телесный угол. Вычисление полного эффективного сечения.
	15. Соударения идеально упругих шаров. Упругие взаимодействия частиц. Эффект Рамзауэра-Таундсенда. Траектория движущейся частицы в поле рассеивающего центра.
	16. Эффективное сечение упругого рассеяния двух заряженных частиц. Формула Резерфорда.
	17. Неупругие соударения первого и второго рода. Дифференциальные эффективные сечения ионизации и возбуждения атомов и молекул.
	18. Тройные дифференциальные эффективные сечения ионизации и их угловое распределение. Двойное дифференциальные эффективные сечения ионизации. Полное эффективное сечение ионизации.
	19. Классические методы вычисления эффективных сечений возбуждения энергетических уровней и ионизации атомов и молекул. Модель Томсона. Эффективное сечение ионизации по модели Томсона.
	20. Полуэмпирические и эмпирические формулы для сечения ионизации. Формула Дравина. Формула Гризинского. Дифференциальное и полное эффективное сечение возбуждения уровня атома или молекулы. Прямое возбуждение. Возбуждение с электронным обменом.
	21. Эффективные сечения ступенчатых процессов возбуждения и ионизации.
	22. Квантово-механические методы вычисления эффективных сечений взаимодействий. Теория возмущений. Волновое уравнение системы сталкивающих частиц. Волновая функция рассеянных электронов. Амплитуда рассеянной волны.
	23. Борновское приближение и условия его применимости. Упругое рассеяние электронов: рассеяние на малые и большие углы, изотропное и анизотропное рассеяние. Вычисление дифференциальных эффективных сечений возбуждения энергетических уровней и ионизация электронным ударом в борновском приближении.
	24. Прямая и ступенчатая ионизации атомов и молекул электронным ударом. Ионизация при столкновении тяжелых частиц. Параметр Месси.
	25. Электрон-ионная рекомбинация (диссоциативная, трехчастичная, радиационная).
	26. Прилипание электронов (диссоциативное, трехчастичное). Разрушение отрицательных ионов (ассоциативный отрыв электрона, разрушение отрицательного иона электронным ударом, процессы отрыва электрона при столкновении с возбужденными частицами).
	27. Перезарядка.
	28. Ион-ионная рекомбинация.
	29. Диффузионные потери заряженных частиц. Свободная и амбиполярная диффузии.
	30. Методы измерения сечений парных и тройных взаимодействий. Экспериментальное определение эффективных дифференциальных сечений, общих и суммарных сечений, констант скоростей парных и тройных взаимодействий.

Перечень задач

1. Определить диапазон энергий и скоростей заряженных частиц (q=qp, M=35mp), при которых возможно применять классический метод расчета эффективного сечения их взаимодействия.
2. Сечение взаимодействия электронов с молекулами газа равно 10-18 см-2 и не зависит от энергии электронов. Температура электронов 5 эВ. Определить константу взаимодействия электронов с молекулами газа.
3. Сечение взаимодействия протона с молекулами газа равно 10-20 см-2 и не зависит от энергии протонов. Температура протонов 1000 К. Определить частоту взаимодействия протонов с молекулами газа при давлении газа 0.1 Тор и температуре газа 200 К.
4. Вычислить длину свободного пробега молекул газа, радиус которых в 5 раз больше радиуса атома водорода, при давлении 150 Тор и температуре газа 600 К.
5. Вычислить длину свободного пробега атомов гелия, считая, что их радиус в 1,5 раз больше радиуса атома водорода, при давлении 0.1 Тор и температуре газа 100 К.
6. Определить максимальную энергию и скорость протона, при которых справедлив классический метод вычисления эффективного сечения рассеяния протона на протоне.
7. Вычислить частоту возбуждения состояния 21S атомов гелия электронным ударом при давлении газа 7 Тор, температуре газа 600 К и температуре электронов 4 эВ. Пороговая энергия возбуждения рассматриваемого уровня электронным ударом εo=21 эВ, максимальное сечение данного процесса равно σm=10-17 см2 и достигает при εm=100 эВ.
8. Вычислить частоту столкновения двух атомов ксенона при давлении газа р=76 Тор и температуре газа Т=1500 К, если полное сечение их взаимодействия σ=3⋅10-15см2.
9. Вычислить длину свободного пробега молекул в воздухе при давлении р=100 Тор и температуре газа Т=900 К, считая, что сечение рассеяния в три раза больше, чем газокинетическое сечение упругого рассеяния атомов водорода.
10. Вычислить газокинетическое сечение рассеяния молекулярных частиц (М=100 а.е.м.) друг на друге и частоту их столкновений при нормальных условиях, если размер молекулы в 5 раз больше размера атома водорода.

Текущий контроль успеваемости и промежуточная аттестация проводятся на основе приведенного выше перечня вопросов.

6.2. Шкала и критерии оценивания

**7. Ресурсное обеспечение**

**Основная литература**

1. А.М.Девятов, В.М.Шибков. «Элементарные процессы и кинетика низкотемпературной плазмы», Издательство МГУ, Москва, 1992.
2. А.М.Девятов, В.М.Шибков. «Элементарные процессы в ионизованном газе», Издательство МГУ, Москва, 2001.
3. А.М.Девятов. Упругое рассеяние электронов на возбужденных атомах. М.: МГУ, 1991, 63с.
4. Мак-Даниель И. Процессы столкновений в ионизованных газах. М.: 1967, 832с.
5. Месси Г., Бархоп Е. Электронный и ионные столкновения. М.: 1958, 604с.
6. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Т.1. М.: 1932, 432с.
7. С.А.Зарин, А.А.Кузовников, В.М.Шибков. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. Глава 3. -М.: Нефть и газ, 1996, 204с.
8. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. М.: 1961, 323с.
9. Смирнов Б.М. Атомные столкновения и электронные процессы в плазме. М.: 1968, 363с.

**Дополнительная литература**

1. А.А.Матвеев, В.П.Силаков. //Неравновесная кинетика процессов в низкотемпературной водородной плазме. //ИОФ РАН. Москва, 1994. Препринт № 8.
2. А.Ю.Костинский, А.А.Матвеев, В.П.Силаков. //Кинетические процессы в неравновесной азотно-кислородной плазме. //ИОФ РАН. Москва, 1990. Препринт №87.
3. Р.С.Константиновский, В.М.Шибков. Л.В.Шибкова. Влияние газового разряда на воспламенение водородно-кислородной смеси. //Кинетика и катализ, 2005, т.46, № 6, с.821-834.
4. Toshizo Shirai, Tatsuo Tabata, Hiroyuki Tawara, Yukikazu Itikawa // Atom. Data and Nucl. Data Tables. 2002. V. 80. № 2. P. 147.
5. Brunger M.J., Buckman S.J. Electron-Molecule Scattering Cross-Section. I. Experimental techniques and data for diatomic molecules // Phys. Rep. 2002. № 357. P. 215.
6. Sobrinho A.A., Machado L.E., Michelin S.E., Mu-Tao L., Brescansin L.M. // J. Molecular Structure (Theochem). 2001. № 539. P. 65.

Интернет-ресурсы

physelec.phys.msu.ru

**8. Язык преподавания:** русский.

1. *Текущий контроль успеваемости может быть реализован в рамках занятий лекционного и(или) семинарского типа.* [↑](#footnote-ref-1)
2. *Часы на проведение промежуточной аттестации выделяются из часов самостоятельной работы обучающегося* [↑](#footnote-ref-2)