

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИСЭ СО РАН)

УТВЕРЖДАЮ
директор ИСЭ СО РАН
академик РАН



Н. А. Ратахин

Н. А. Ратахин

«24» августа 2018 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Эмиссионные и электроразрядные явления в вакууме»

основных профессиональных образовательных программ высшего образования —
программ подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре
по направлениям подготовки кадров высшей квалификации

№ п/п	Направление подготовки	Наименование ОПОП (профиль подготовки)	Место дисциплины в учебном плане
1	03.06.01 Физика и астрономия	Физическая электроника	Вариативная часть, дисциплина по выбору
2		Электрофизика, электрофизические установки	Вариативная часть, дисциплина по выбору
3	11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи	Вакуумная и плазменная электроника	Вариативная часть, дисциплина по выбору

1. Общая характеристика дисциплины

1.1. Место дисциплины в структуре ООП

Перечень основных профессиональных образовательных программ высшего образования — программ подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлениям подготовки кадров высшей квалификации, в учебные планы которых входит данная дисциплина, и ее место в учебном плане обозначены на титульном листе настоящей рабочей программы.

Дисциплина изучает физические основы электрической проводимости в вакуумных изолирующих промежутках, механизмы эмиссии заряженных частиц, причины нарушения электрической изоляции в вакууме, а также вопросы практического использования эмиссионных явлений, электрического пробоя и разряда в вакууме.

Для успешного освоения дисциплины аспирант должен:

знать: общую физику, физику твердого тела, классическую электродинамику, уравнения математической физики в объеме, предусмотренном для магистров физики;

уметь: применять методы математического анализа.

1.2. Цели и задачи освоения дисциплины

1. Приобретение широких, целостных и глубоких знаний о механизмах эмиссии заряженных частиц, основных физических процессах, определяющих и сопровождающих электроразрядные явления в вакуумных высоковольтных промежутках.

2. Формирование умения вычленять физические факторы, существенные в вакуумных электроразрядных системах, выполнять качественные оценки и расчеты параметры физических процессов в таких системах.

3. Изучение методов практического использования вакуумного разряда.

4. Изучение методов улучшения электрической изоляции в вакууме.

В результате изучения дисциплины аспирант должен знать:

- термины и понятия, используемые для описания эмиссионных явлений в вакууме;
- физические основы основных видов эмиссии из конденсированного вещества в вакуум;
- основные физические процессы, приводящие к нарушению электрической изоляции в вакууме;
- физические основы эмиссии заряженных частиц из плазмы вакуумного разряда;
- направления использования эмиссионных явлений в диагностических целях;
- основные методы улучшения электрической изоляции в вакууме;
- направления практического использования плазмы вакуумного разряда.

и иметь навыки:

- анализа элементарных эмиссионных процессов в электровакуумных устройствах различного применения.

1.3. Формируемые компетенции

Освоение настоящей дисциплины дает вклад в формирование у обучающихся следующих компетенций:

ОПК-1: Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий.

ПК-1: Знание механизмов эмиссии заряженных частиц, основных физических процессах, определяющих и сопровождающих электроразрядные явления в вакуумных высоковольтных промежутках, методов практического использования вакуумного разряда, методов улучшения электрической изоляции в вакууме (как составляющая профессиональной компетенции ПК-1 в ООП, в состав которой включается настоящая дисциплина).

ПК-2: Умение вычленять физические факторы, существенные в вакуумных электроразрядных системах, выполнять качественные оценки и расчеты параметры физических процессов в таких системах (как составляющая профессиональной компетенции ПК-2 в ООП, в состав которой включается настоящая дисциплина).

УК-1: Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.

УК-2: Способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки.

УК-3: Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач.

Таблица соответствия компонентов фонда оценочных средств (ФОС) по дисциплине формируемым компетенциям приведена в п. 5.2 рабочей программы.

2. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы (108 часов).

2.1. Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Раздел дисциплины	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов, и их трудоемкость (в часах)		
		Лекции	Лабораторные работы	Самостоятельная работа
1	Раздел 1. Введение в дисциплину	2	—	4
2	Раздел 2. Эмиссия электронов из конденсированных сред	18	—	24
3	Раздел 3. Эмиссия заряженных частиц из плазмы	4	—	8
4	Раздел 4. Электрическая изоляция и разряд в вакуумных промежутках	8	—	12
5	Раздел 5. Практические применения вакуумного разряда	4	16	8
	ВСЕГО	36	16	56

2.2. Наименование тем, их содержание, объём в часах лекционных занятий

Порядковый номер лекции	Раздел, тема учебного курса, содержание лекции	Трудоемкость	
		час.	зач. ед.
	РАЗДЕЛ 1. Введение в дисциплину	2	0,055
1	Тема 1. История изучения вакуумного разряда Исторический экскурс в развитие вакуумного разряда и вакуумной изоляции как научного направления. Краткая аннотация курса.	2	0,055
	РАЗДЕЛ 2. Эмиссия электронов из конденсированных сред	18	0,5
2	Тема 2.1. Основные виды эмиссии электронов из конденсированного вещества Работа выхода электрона из конденсированного вещества. Статистические характеристики свободного электронного газа в металлах. Поверхность твёрдого тела. Эффект Шоттки. Фундаментальные виды эмиссии. Кон-	2	0,055

	тактная разность потенциалов в вакуумном промежутке.		
3	<u>Тема 2.2. Термоэлектронная эмиссия (начало)</u> Формула Ричардсона–Дэшмана. Влияние электрического поля на термоэлектронную эмиссию. Измерение работы выхода термоэмиссионным методом.	2	0,055
4	<u>Тема 2.2. Термоэлектронная эмиссия (окончание)</u> Калориметрический эффект термоэлектронной эмиссии. Термоэлектронные катоды. Термоэмиссионный преобразователь.	2	0,055
5	<u>Тема 2.3. Вторичная эмиссия</u> Вторичная электронно-электронная эмиссия. Вторичная потенциальная ионно-электронная эмиссия. Вторичная кинетическая ионно-электронная эмиссия. Катодное распыление. Поверхностная ионизация.	2	0,055
6	<u>Тема 2.4. Фотоэлектронная эмиссия (начало)</u> Феноменологическое описание явления. Экспериментальная проверка феноменологической модели. Критика феноменологической модели. Селективность фотокатодов. Влияние температуры на фотоэмиссию. Влияние внешнего электрического поля на фотоэмиссию.	2	0,055
7	<u>Тема 2.4. Фотоэлектронная эмиссия (окончание)</u> Многофотонная фотоэмиссия металлов. Фотоэмиссионные приборы для исследования быстротекущих процессов.	2	0,055
8	<u>Тема 2.5. Автоэлектронная эмиссия (начало)</u> Формула Фаулера–Нордгейма. Калориметрический эффект автоэмиссии. Ограничение тока автоэмиссии пространственным зарядом эмитированных электронов.	2	0,055
9	<u>Тема 2.5. Автоэлектронная эмиссия (продолжение)</u> Определение параметров автоэлектронных катодов из экспериментальных данных. Экспериментальное наблюдение автоэлектронной эмиссии. Эмиссионный сканер.	2	0,055
10	<u>Тема 2.5. Автоэлектронная эмиссия (окончание)</u> Эмиссионные центры в практически используемых вакуумных промежутках. Предельные токи автоэмиссии.	2	0,055
РАЗДЕЛ 3. Эмиссия заряженных частиц из плазмы		4	0,11
11	<u>Тема 3.1. Эмиссия электронов из плазмы.</u>	2	0,055
12	<u>Тема 3.2. Эмиссия ионов из плазмы.</u>	2	0,055
РАЗДЕЛ 4. Электрическая изоляция и разряд в вакуумных промежутках		8	0,22
13	<u>Тема 4.1. Предпробойные явления и иницирование пробоя</u> Катодное иницирование пробоя. Анодное иницирование пробоя. Жидкая фаза на электроде. Эффект полного напряжения.	2	0,055
14	<u>Тема 4.2. Пробой по поверхности диэлектрика в вакууме</u>	2	0,055
15	<u>Тема 4.3. Взрывная электронная эмиссия (начало)</u> Вольт-амперная характеристика диода с взрывоэмиссионным катодом. Катодное пятно. Зависимость времени запаздывания пробоя от плотности тока в эмиссионном центре и от напряженности электрического поля на катоде при катодном механизме иницирования пробоя.	2	0,055
16	<u>Тема 4.3. Взрывная электронная эмиссия (окончание)</u> Вакуумная дуга. Эрозия электродов. Эмиссия и испарение капельной фракции.	2	0,055
РАЗДЕЛ 5. Практические применения вакуумного разряда		4	0,11
17	<u>Тема 5.1. Вакуумный сетевой выключатель.</u>	2	0,055
18	<u>Тема 5.2. Взрывоэмиссионные катоды</u> Сильноточные источники электронных пучков на основе взрывной эмиссии электронов.	2	0,055
СУММАРНАЯ ТРУДОЕМКОСТЬ		36	1,0

2.3. Практические (семинарские) занятия — не предусмотрены.

2.4. Лабораторные работы

Лабораторные работы проводятся на стенде для исследования процессов формирования и транспортировки нерелятивистского сильноточного электронного пучка в плазмонаполненном диоде и воздействия электронного пучка на различные материалы.

Перечень лабораторных работ:

- 1) Сильноточный отражательный разряд и его диагностика (4 часа).
- 2) Воздействие сильноточного электронного пучка на металлические материалы (4 часа).
- 3) Генерация, транспортировка и диагностика сильноточного низкоэнергетического электронного пучка в плазмонаполненном диоде (4 часа).
- 4) Многозондовая диагностика низкотемпературной плазмы в вакууме (4 часа).

2.5. Самостоятельная работа аспирантов

Внеаудиторная самостоятельная работа аспирантов включает следующие виды деятельности:

- проработку учебного материала по конспектам лекций и учебной литературе,
- конспектирование и реферирование источников из списка дополнительной учебной и научной литературы;

Темы, выносимые на самостоятельную проработку:

- 1) Телевизионные приборы на основе внешнего и внутреннего фотоэффекта (2 часа).
- 2) Определение работы выхода термоэмиссионным методом (1 час).
- 3) Определение работы выхода фотоэмиссионным методом (1 час).
- 4) Определение работы выхода автоэмиссионным методом (1 час).
- 5) Вторично-ионная масс-спектрометрия (2 часа).
- 6) Автоэмиссионные панели (1 час).
- 7) Атомно-силовая и туннельная микроскопия (4 часа).
- 8) Ферроэлектрические катоды и источники электронных пучков на их основе (2 часа).

2.5.1. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов.

Используются виды самостоятельной работы аспиранта: в читальном зале библиотеки, в учебных кабинетах, на рабочих местах с доступом к интернет-ресурсам, и в домашних условиях. Аспиранты имеют возможность получать консультации у лектора.

Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим основную и дополнительную учебную и научную литературу, а также конспекты лекций.

2.6. Примеры вопросов для контрольных работ

Контрольная работа № 1

(Ненужное зачеркнуть)

- | | |
|--|---|
| 1. Какой вид имеет распределение эмитированных термоэлектронов по энергии? | Максвелла
Бозе–Эйнштейна
Ферми–Дирака
Максвелла |
| 2. Какой вид имеет распределение электронов по энергии в металле при $T = 0$ К ? | Бозе–Эйнштейна
Ферми–Дирака
Среднюю кинетическую энергию частиц
Среднюю потенциальную энергию частиц
Тепловую скорость частиц |
| 3. Что описывает выражение $\left(\frac{8kT}{\pi m}\right)^{1/2}$? | |

4. Чье имя носит формула $j = A_0 \bar{D} T^2 e^{-\frac{\phi}{kT}}$?
 Ричардсона
 Фаулера
 Ленгмюра
5. Что происходит с работой выхода при наличии электрического поля, ускоряющего электроны?
 Не изменяется
 Повышается
 Понижается
6. Какой знак имеет калориметрический эффект при термоэлектронной эмиссии?
 Положительный всегда
 Положительный или отрицательный
 Отрицательный всегда
7. Возможно ли туннелирование электрона сквозь потенциальный барьер бесконечной ширины?
 Да, всегда
 Да, при высоких температурах
 Нет, никогда
8. Как изменяется фототок при изменении светового потока?
 Пропорционально квадратному корню из потока
 Пропорционально потоку
 Пропорционально квадрату потока
9. Как изменяется максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов при увеличении длины волны падающего света?
 Растет
 Не изменяется
 Падает
10. Как изменяется максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов при увеличении частоты падающего света?
 Растет
 Не изменяется
 Падает
11. Как изменяется максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов при увеличении интенсивности падающего светового потока?
 Растет
 Не изменяется
 Падает
12. Как изменяется пороговая для фотоэмиссии частота света при наличии электрического поля, ускоряющего электроны?
 Растет
 Не изменяется
 Падает
13. Как изменяется пороговая для фотоэмиссии длина волны света при наличии электрического поля, ускоряющего электроны?
 Растет
 Не изменяется
 Падает
14. Как изменяется пороговая для фотоэмиссии частота света при росте температуры катода?
 Растет
 Не изменяется
 Падает
15. Как изменяется пороговая для фотоэмиссии длина волны света при росте температуры катода?
 Растет
 Не изменяется
 Падает
16. В какой области спектра вторичных электронов наблюдаются пики характеристических потерь электронов?
 Истинно вторичных электронов
 Неупруго отраженных электронов
 Упруго отраженных электронов
17. В какой области спектра вторичных электронов наблюдаются Ожэ пики?
 Истинно вторичных электронов
 Неупруго отраженных электронов
 Упруго отраженных электронов
18. Возможна ли потенциальная ионно-электронная эмиссия при облучении медной поверхности ионами меди?
 Возможна всегда
 Возможна иногда
 Невозможна никогда
19. Возможна ли потенциальная ионно-электронная эмиссия при облучении медной поверхности ионами гелия?
 Возможна всегда
 Возможна иногда
 Невозможна никогда
20. Проявляется ли эффект Шоттки при автоэмиссии?
 Да, всегда
 Да, при высоких температурах
 Нет, никогда
21. Чье имя носит формула $j = \frac{e^3 E^2}{8\pi h \phi^2(y)} \exp\left[\frac{-8\pi(2m)^{1/2} \phi^{3/2} \mathbf{v}(y)}{3heE}\right]$?
 Ричардсона
 Фаулера
 Ленгмюра
22. Возможно ли туннелирование электрона сквозь потенциальный барьер конечной ширины?
 Да, всегда
 Да, при высоких температурах
 Нет, никогда
23. Какой знак имеет калориметрический эффект при автоэлектронной эмиссии?
 Положительный всегда
 Положительный или отрицательный
 Отрицательный всегда

- | | | |
|-----|--|--|
| 24. | Как влияет пространственный заряд эмитированных электронов на эмиссию? | Подавляет
Не влияет
Способствует |
| 25. | Как смещается максимум распределения эмитированных электронов по энергиям относительно уровня энергии вакуума (пространства без частиц) при росте напряжённости электрического поля? | Удаляется
Не изменяется
Приближается |
| 26. | Как смещается максимум распределения эмитированных электронов по энергиям относительно уровня энергии вакуума (пространства без частиц) при росте температуры эмиттера? | Удаляется
Не изменяется
Приближается |

Контрольная работа № 2

- | | | |
|-----|--|--|
| 27. | Возможно ли провисание потенциала в вакуумном диоде при стационарной эмиссии электронов из плазменного эмиттера | Да, всегда
Да, при некоторых условиях
Нет, никогда |
| 28. | Которая из величин, температура электронов или их концентрация, оказывает большее влияние на плотность тока электронного плазменного эмиттера? | Концентрация
Температура
Концентрация и температура в равной степени |
| 29. | Температура какой компоненты плазмы, электронной или ионной, определяет плотность тока эмиссии ионов из плазмы? | Ионов
Электронов
Ионов и электронов в равной степени |
| 30. | Как соотносится кинетическая и потенциальная энергия электронов в плазме? | Кинетическая много больше потенциальной
Кинетическая много меньше потенциальной
Кинетическая и потенциальная одного порядка величины |
| 31. | От чего зависит электрическая прочность вакуумного промежутка? | Только от напряженности электрического поля
Только от разности потенциала
От напряженности электрического поля и разности потенциалов |
| 32. | Где появляется свечение плазмы при вакуумном пробое раньше? | На катоде
В промежутке
На аноде |
| 33. | Как изменяется вероятность вакуумного пробоя с ростом площади электродов при прочих равных условиях? | Растет
Не изменяется
Падает |
| 34. | Как изменяется напряженность электрического поля вакуумного пробоя с ростом межэлектродного расстояния? | Растет
Не изменяется
Падает |
| 35. | Каково соотношение кинетической энергии ионов плазмы катодного пятна вакуумной дуги и значения катодного падения потенциала, умноженного на заряд электрона? | Энергия ионов выше потенциала, умноженного на заряд электрона
Энергия ионов равна потенциалу, умноженному на заряд электрона
Энергия ионов ниже потенциала, умноженного на заряд электрона |
| 36. | Как изменяется удельная ионная эрозия катода с ростом тока разряда при горении катодной дуги в вакууме? | Растет
Не изменяется
Падает |
| 37. | Как влияет магнитное поле на направление перемещения катодных пятен в вакуумной дуге? | Пятна перемещаются в направлении $-j \times B$
Не влияет
Пятна перемещаются в направлении $j \times B$ |
| 38. | Каков уровень пороговых токов вакуумной дуги на металлическом катоде | Десятые доли ампера
Единицы ампер
Десятки ампер |

39. Как движутся по отношению друг к другу катодные пятна при одновременном горении в сильноточной вакуумной дуге? Сближаются
Движутся независимо
Расходятся

3. Учебно-методические материалы

3.1. Основная и дополнительная литература

а) основная:

1. Добрецов А.Н., Гомоюнова М.В., Эмиссионная электроника.- Москва: Наука, 1966.- 564 с.
2. Фоменко В.С., Эмиссионные свойства материалов. Справочник.- Киев: Наукова думка, 1981.- 339 с.
3. Шимони К., Физическая электроника.- Москва: Энергия, 1977.- 605 с.
4. Г.А. Месяц, Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга.- М.: Наука, 2000.- 424 с.
5. Н.И. Сливков, Процессы при высоком напряжении в вакууме.- М.: Энергоатомиздат, 1986.- 255 с.
6. В.И. Раховский, Физические основы коммутации электрического тока в вакууме.- М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1970. - 536 с.

б) дополнительная:

1. Ашкрофт Н., Мермин Н., Физика твердого тела (в двух томах). М.: Мир, 1979.
Т. 1. 399 с. Т. 2. 422 с.

4. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- аудиторный фонд ИСЭ СО РАН, средства мультимедиа;
- рабочее место аспиранта с выходом в Интернет;
- библиотечный фонд ИСЭ СО РАН;
- стенд для исследования процессов формирования и транспортировки нерелятивистского сильноточного электронного пучка в плазмонаполненном диоде и воздействия электронного пучка на различные материалы.

5. Оценка качества освоения дисциплины

5.1. Оценочные мероприятия и формирование оценки

Оценка качества освоения дисциплины обучающимся осуществляется с использованием балльной системы. Перечень оценочных мероприятий и максимальное количество баллов, которое может быть получено обучающимся в результате каждого мероприятия, приведены в таблице.

Оценочное мероприятие	Максимальное число баллов
Контрольные работы	20
Оценка работы на лабораторных занятиях	40
Дифференцированный зачет	40
Максимальный суммарный балл	100

На дифференцированном зачете аспиранту выставляется оценка и соответствующее ей число баллов:

- «Отлично»: 32—40 баллов.
- «Хорошо»: 23—31 баллов.
- «Удовлетворительно»: 10—22 баллов.
- «Неудовлетворительно»: 10 баллов и менее.

Итоговая оценка качества освоения дисциплины определяется величиной суммарного балла:

- «Отлично»: 81—100 баллов.
- «Хорошо»: 61—80 баллов.
- «Удовлетворительно»: 41—60 баллов.
- «Неудовлетворительно»: 40 баллов и менее.

5.2. Соответствие оценочных мероприятий (компонентов ФОС) дисциплины формируемым компетенциям, перечисленным в п. 1.3

Компонента ФОС, оценочное мероприятие	Компетенции					
	ОПК-1	ПК-1	ПК-2	УК-1	УК-2	УК-3
Контрольные работы		+	+			
Оценка работы на лабораторных занятиях	+	+	+	+	+	+
Дифференцированный зачет	+	+	+	+		

Рабочая программа составлена на основании:

- федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлениям подготовки 03.06.01 Физика и астрономия и 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи, утвержденных приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 867;
- паспортов специальностей научных работников 01.04.04 — физическая электроника; 01.04.13 — электрофизика, электрофизические установки; 05.27.02 — вакуумная и плазменная электроника;
- программ-минимумов кандидатских экзаменов по выше перечисленным специальностям, утвержденных приказом Минобрнауки РФ от 08.10.2007 г. № 274.

Составитель рабочей программы:
ведущий научный сотрудник
к.ф.-м.н.

А. В. Батраков

Рабочая программа рассмотрена и одобрена ученым советом ИСЭ СО РАН.
Протокол № 13 от «24» августа 2018 г.

Секретарь ученого совета, д.ф.-м.н.



И. В. Пегель

Дополнения и изменения в рабочей программе
за _____ / _____ учебный год

В рабочую программу дисциплины «Эмиссионные и электроразрядные явления в вакууме» вносятся следующие дополнения и изменения:

Дополнения и изменения внес _____
(должность, Ф.И.О., подпись)

Рабочая программа пересмотрена и одобрена на заседании ученого совета ИСЭ СО РАН.
Протокол № ____ от « » _____ 20__ г.

Секретарь ученого совета

подпись

Ф. И. О.