

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



*Р. А. Ратахин*  
Н. А. Ратахин  
« 24 » августа 2018 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**  
**кандидатского экзамена**  
**по специальности**  
**01.04.13 – электрофизика, электрофизические**  
**установки**

основной профессиональной образовательной программы высшего образования — программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлениям подготовки кадров высшей квалификации

№ п/п	Направление подготовки	Наименование ОПОП (профиль подготовки)
1	03.06.01 Физика и астрономия	Электрофизика, электрофизические установки

## 1. Общие положения

1.1. Программа кандидатского экзамена разработана на основании:

- федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 867;

- паспорта специальностей научных работников 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки;

- программы-минимум по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки, утвержденной приказом Минобрнауки РФ от 08.10.2007 г. № 274.

## 2. Порядок проведения кандидатского экзамена

2.1. Прием кандидатского экзамена проводится в сроки, определенные учебным планом основной образовательной программы обучения аспиранта, как правило, в конце 5-ого или в 6-ом учебном семестре.

2.2. Для проведения экзамена назначается экзаменационная комиссия. Председателем комиссии является директор института. Члены комиссии назначаются председателем комиссии из числа высококвалифицированных научных работников института.

2.3. Научный руководитель аспиранта не позднее, чем к началу 5-го семестра обучения аспиранта, разрабатывает и представляет в экзаменационную комиссию дополнительную программу вопросов к экзамену, учитывающую специфику научно-исследовательской работы аспиранта.

2.4. В экзаменационный билет включаются:

- три основных вопроса из программы-минимум по специальности 01.04.13, утвержденной приказом Минобрнауки РФ от 08.10.2007 г. № 274;

- три основных вопроса из дополнительной программы (п. 2.4).

2.5. Экзаменационная комиссия при необходимости задает аспиранту, сдающему экзамен, до трех дополнительных вопросов по материалу программы-минимума и один вопрос по материалу дополнительной программы.

2.6. По итогам кандидатского экзамена составляется протокол, в котором указывается состав экзаменационной комиссии, оценки, полученные аспирантов по каждому из основных и дополнительных вопросов и итоговая оценка по кандидатскому экзамену.

## 3. Содержание программы-минимум по специальности 01.04.13 — электрофизика, электрофизические установки, утвержденной приказом Минобрнауки РФ от 08.10.2007 г. № 274

### 1. Основы электродинамики

Электростатика. Закон Кулона. Теорема Гаусса. Проводники в электрическом поле. Работа электрических сил, потенциал электрического поля. Уравнение Пуассона и Лапласа. Потенциал объемных и поверхностных зарядов. Двойной электрический слой. Энергия взаимодействия электрических зарядов. Энергия электрического поля. Пондермоторные силы.

Диэлектрики. Поляризация диэлектриков. Свободные и связанные заряды. Уравнение электрического поля в произвольной среде. Пондермоторные силы в диэлектриках. Энергия электрического поля в диэлектриках. Тензор напряжений электрического поля. Пьезоэлектрики. Сегнетоэлектрики.



Магнитостатика. Магнитное поле постоянных токов. Сила Лоренца. Векторный потенциал магнитного поля. Уравнения магнитного поля. Потенциальные и соленоидальные магнитные поля. Граничные условия в магнитном поле токов. Пондермоторные силы в магнитном поле. Взаимная индукция и самоиндукция линейных проводников.

Магнитное поле в веществе. Намагниченность магнитов. Уравнения макроскопического магнитного поля в магнетиках. Механизмы намагничивания магнетиков. Теорема Лармора. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферромагнетизм.

Электромагнитное поле в неподвижной среде. Электромагнитные волны. Уравнения Максвелла. Теорема Пойнтинга. Уравнение для потенциалов электромагнитного поля. Решение волнового уравнения. Запаздывающие и опережающие потенциалы. Скорость распространения электромагнитных возмущений.

Квазистационарное электромагнитное поле. Глубина проникновения магнитного поля в проводник. Скин-эффект.

Распространение электромагнитного поля в волноводах. Критическая длина волны. Фазовая и групповая скорости. Дисперсия.

Электромагнитные колебания в полых резонаторах.

Излучение заряженных частиц. Условия излучения в неограниченном пространстве. Поле излучения системы зарядов. Волновая зона. Дипольное излучение осциллятора. Излучение релятивистской частицы. Магнитотормозное излучение. Переходное излучение. Черенковское излучение электромагнитных волн в среде. Спонтанное и индуцированное излучение. Вынужденное комбинационное рассеяние.

Численные методы решения краевых задач электродинамики. Метод конечных разностей. Быстрое преобразование Фурье, методы прогонки и циклической редукции. Метод конечных элементов. Вариационные разностные методы. Функция Грина. Метод конечных элементов.

## 2. Основы теории электрических цепей

Линейные цепи. Методы расчета линейных электрических цепей в стационарном режиме. Уравнения Кирхгофа. Метод комплексных амплитуд. Метод контурных токов. Метод узловых напряжений. Метод эквивалентного генератора. Цепи с зависимыми источниками. Цепи с взаимными индуктивностями.

Методы расчета линейных цепей в нестационарных режимах. Классический метод. Операторный метод (преобразование Лапласа). Метод переменных состояний. Спектральный метод (преобразование Фурье). Интеграл Дюамеля. Цепные схемы, передаточные функции. Обратная связь, электрические фильтры.

Цепи с распределенными параметрами. Длинные линии. Телеграфные уравнения. Решение телеграфных уравнений в стационарном режиме. Падающие и отраженные волны. Распределение токов и напряжений в линии. Входное сопротивление линии. Согласование длинных линий.

Решение телеграфных уравнений в нестационарном режиме. Переходные процессы при коммутации предварительно заряженных линий.

Синтез линейных электрических цепей. Синтез пассивных двухполюсников. Свойства входных функций пассивных двухполюсников. Положительные вещественные функции. Критерии физической реализуемости. Алгоритм Кауэра. Алгоритм Фостера.

Элементы синтеза четырехполюсника. Синтез четырехполюсников по трем заданным  $Z$ - или  $Y$ -параметрам, по передаточной функции в виде  $\Gamma$ -образного звена из  $rC$ - или  $rL$ -элементов. Синтез неуравновешенных четырехполюсников в виде каскадного соединения.

Нелинейные цепи. Методы расчета нелинейных цепей постоянного тока. Метод условной линеаризации. Графические методы – лестничная структура, схемы с двумя



узлами. Метод кусочно-линейной аппроксимации. Трансформатор с ферромагнитным сердечником. Цепи с ферромагнетиками. Феррорезонанс.

Методы расчета нелинейных цепей в нестационарном режиме. Метод интегрируемой аппроксимации. Метод кусочно-линейной аппроксимации. Метод медленно меняющихся амплитуд. Метод малого параметра. Метод интегральных уравнений. Вариационные методы. Цепи с инерционными элементами, параметрические цепи.

### 3. Строение вещества

Газы. Основы кинетической теории газов. Давление газа, уравнение состояния идеального газа. Распространение звуковых волн в идеальном газе. Ударные волны в идеальном газе. Эффективное сечение и средняя длина свободного пробега. Процессы переноса.

Плазма. Основные понятия. Кинетическая теория плазмы, распределение частиц по скоростям, эффективные сечения и частоты столкновений. Механизмы ионизации и рекомбинации в плазме. Термическая ионизация, уравнение Саха. Дебаевский радиус. Плазменная частота. Испускание и поглощение фотонов. Диффузия и дрейф частиц. Амбиполярная диффузия. Соотношение между подвижностью и коэффициентами диффузии.

Проводимость низкотемпературной плазмы. Проводимость полностью ионизированного газа (формула Спитцера). Образование непрерывного спектра в плазме. Свободно-свободные и свободно-связанные переходы в нагретом ионизированном газе.

Системы и методы плазменной энергетики. Плазменный пиролиз органических веществ. Плазменные системы переработки токсичных отходов. Генераторы низкотемпературной плазмы (плазмотроны), физические основы и техническая реализация.

Жидкости. Макроскопические свойства жидкостей. Силы взаимодействия молекул. Явление переноса в жидкостях.

Твердые тела. Кристаллическая решетка. Силы связи в решетке. Электронный газ, модель потенциальной ямы Шоттки. Зонная модель. Проводники, полупроводники, диэлектрики. Работа выхода. Явление сверхпроводимости.

### 4. Вещество в сильном электромагнитном поле

Эмиссия заряженных частиц с поверхности вещества. Эмиссия электронов из твердого тела. Термоэмиссия, автоэлектронная эмиссия, фотоэмиссия, вторичная электронная эмиссия, взрывная эмиссия, ионная эмиссия.

Газовый разряд. Формы разряда в газах. Самостоятельный и несамостоятельный разряды. Лавинный разряд. Закон Пашена. Стримерная форма разряда, переход от стримера к канальной форме разряда. Коронный и тлеющий разряды. Дуговой разряд. Изоляционные свойства газовых диэлектриков. Сильноточный газовый разряд в плотных средах.

Прохождение тока через жидкость. Проводимость электролитов. Топливные элементы. Технический электролиз. Проводимость жидких изоляторов. Диэлектрические потери. Электрическая прочность и пробой жидких диэлектриков. Ударные волны, генерируемые в конденсированной среде. Разряд в жидкостях.

Проводники, твердые диэлектрики, полупроводники в сильных полях. Проводимость. Криопроводимость. Сверхпроводимость. Эффект Холла. Термоэлектричество. Электрический взрыв проводников. Диэлектрические потери.



## 5. Накопление и коммутация энергии больших мощностей

Пространственно-временная концентрация энергии. Способы накопления энергии и типы накопителей. Характеристики накопителей энергии, сравнительные характеристики различных типов накопителей. Максимальная плотность энергии у различных типов накопителей, физические ограничения на плотность энергии в накопителях. Способы передачи энергии от накопителей к нагрузке, оптимизация процесса передачи энергии. Согласование энергии различных видов.

Емкостные накопители энергии. Емкостные накопители энергии на основе малоиндуктивных импульсных конденсаторов. Принципы построения генераторов импульсных напряжений и генераторов импульсных токов. Классификация емкостных накопителей энергии. Защита конденсаторных батарей на высокую энергию. Коммутаторы емкостных накопителей энергии на основе конденсаторов (вакуумные, газовые, жидкостные разрядники, разрядные колонны). Схемы поджига и синхронизации разрядников. Особенности работы коммутаторов в генераторах импульсных напряжений и генераторах импульсных токов.

Методы формирования импульсов с помощью емкостных накопителей энергии. Емкостные накопители на линиях с распределенными параметрами. Первичные и промежуточные емкостные накопители энергии. Особенности работы емкостных накопителей энергии на линиях с распределенными параметрами в режиме заряда (хранения) и разряда. Оптимизация по напряжению и мощности накопителей энергии на линиях коаксиального типа с распределенными параметрами. Коммутаторы емкостных накопителей энергии на линиях с распределенными параметрами различных типов (газовые, жидкостные и твердотельные разрядники, разрядники V/N-типа, рельсовые разрядники). Особенности работы коммутаторов накопителей на линиях, конструкции коммутаторов. Методы обеспечения режима многоканальной коммутации.

## 6. Физика сильноточных пучков заряженных частиц

Распространение сильноточных пучков в вакууме. Предельный ток, ограниченный пространственным зарядом. Предельный ток Альвена. Формирование виртуального катода. Нейтрализованный, самосфокусированный пучок. Е-слой. Магнитная изоляция в диодах и линиях передач.

Распространение сильноточных пучков в плазме и газе. Электромагнитные поля, возбуждаемые пучком при инжекции. Равновесное состояние пучка в плазме. Нестационарная ионизация при инжекции пучка в газах. Токовая нейтрализация пучка.

Генерация сильноточных электронных и ионных пучков. Взрывная эмиссия в сильноточном диоде. Плоский диод в режиме Богуславског-Ленгмюра. Парapotенциальный поток в плоском диоде. Коаксиальный диод с магнитной изоляцией. Сильноточные ионные диоды – диод с магнитной изоляцией, рефлексный диод, пинч-рефлексный диод.

Волны и неустойчивости в сильных пучках заряженных частиц. Волны в холодной стационарной плазме. Продольные волны в холодной дрейфующей плазме. Собственные волны в сильноточных пучках. Волны пространственного заряда в замагниченном пучке.

Электростатическая и электродинамическая неустойчивости волн пространственного заряда. Циклотронный резонанс. Неустойчивости в многокомпонентной системе.

## 7. Физика и техника устройств на основе низкотемпературной плазмы

Особенности физических процессов в низкотемпературной плазме.

Плазмохимические, металлургические и другие устройства на основе совместного применения мощных электрических дуговых разрядов и электромагнитных полей. Физика приэлектродных процессов в сильноточных дуговых разрядах.



## 8. Компьютерные технологии

Компьютер как инструмент научной работы. Математическое моделирование с применением компьютерных технологий. Возможности пакетов математических вычислительных программ для решения прикладных задач.

## 4. Литература для подготовки к экзамену

### 4.1. Основная литература

1. Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З.. Физика плазмы для физиков. – М.: Атомиздат, 1979.
2. Беломытцев С. Я., Пегель И. В. Физика сильноточных пучков заряженных частиц. Учебное пособие. – Томск: Издательство ТПУ, 2008. – 115 с.
3. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В. Эмиссионная электроника. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1966. – 564 с.
5. Зельдович И.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. II. Теория поля. М.: Наука, 1988. – 509 с.; Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. - М.: Наука., 1982. – 621 с.
7. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. – 704 с.
8. Попов В.И. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 1995.
9. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987.
10. Рухадзе А.А., Богданкевич Л.С., Росинский С.Е., Рухлин В.Г. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков. М.: Атомиздат, 1981. – 164 с.
11. Франк-Каменецкий А. Д. Лекции по физике плазмы. – М.: Атомиздат, 1964.
12. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. Издание 2-е. –М.: Энергоатомиздат, 1992.

### 3.2. Дополнительная литература

1. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Мощные ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
2. Кузелев М. В., Рухадзе А. А., Стрелков П. С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника / Под ред. А. А. Рухадзе. – Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 543 с.
3. Мейлинг В. Стари Ф. Наносекундная импульсная техника. М.: Атомиздат. - 1973. – 384 с.
4. Месяц Г. А., Пегель И. В. Введение в наносекундную импульсную энергетiku и электронику (курс лекций для физиков и инженеров). – М.: ФИАН, 2009. – 192 с.
5. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. – М.: Мир, 1984. – 431 с.
6. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии / под ред. Г. А. Месяца. – Новосибирск: Наука, 1983. – 168 с.
7. Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Том 1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 496 с. Том 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 648 с.

Составитель:

Составитель программы  
к.т.н.

А. А. Жерлицын