

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

«Физика интенсивных пучков заряженных частиц»

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, обязательная дисциплина
2		Электрофизика, электрофизические установки	Вариативная часть, дисциплина по выбору
3	11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи	Вакуумная и плазменная электроника	Вариативная часть, обязательная дисциплина

Томск — 2018

1. Общая характеристика дисциплины

1.1. Место дисциплины в структуре ОПОП

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 основы динамики заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, физические процессы, происходящие при генерации и транспортировке интенсивных электронных пучков, вопросы магнитной изоляции высоковольтных вакуумных промежутков и передающих линий; затрагиваются вопросы практического применения интенсивных электронных пучков.

Для успешного освоения дисциплины аспирант должен:

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

уметь: применять методы дифференциального и интегрального исчисления, векторного анализа.

1.2. Цели и задачи освоения дисциплины

1. Приобретение широких, целостных и глубоких знаний о физических явлениях, определяющих процессы формирования и транспортировки сильноточных пучков заряженных частиц, способах их получения, а также их применениях в сильноточной электронике и импульсной энергетике.

2. Формирование умения вычленять физические факторы, существенные в электрофизических системах с интенсивными пучками заряженных частиц, выполнять качественные оценки и расчеты параметры физических процессов в таких системах.

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: Наличие широких, целостных и глубоких знаний о физических явлениях, определяющих процессы формирования и транспортировки сильноточных пучков заряженных частиц, способах их получения, и применения (как составляющая профессиональной компетенции ПК-1 той ООП, в состав которой включается настоящая дисциплина).

ПК-2: Умение вычленять физические факторы, существенные в системах с интенсивными пучками заряженных частиц, выполнять качественные оценки и расчеты параметры физических процессов в таких системах (как составляющая профессиональной компетенции ПК-2 той 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	Практические (семинарские) занятия	Самостоятельная работа
1	Введение в дисциплину	4	—	4
2	Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях	8	4	12
3	Транспортировка сильноточных пучков заряженных частиц	6	4	10
4	Формирование сильноточных электронных пучков	14	8	22
5	Электронные пучки с виртуальным катодом	4	2	6
	ВСЕГО	36	18	54

2.2. Лекционные занятия

Порядковый номер лекции	Раздел, тема учебного курса, содержание лекции	Трудоемкость	
		час.	зач. ед.
РАЗДЕЛ 1. Введение в дисциплину		4	0,11
1	<u>Тема 1.1. Интенсивные потоки заряженных частиц в импульсной энергетике и электронике</u> 1.1.1. Импульсная энергетика и электроника, история возникновения и развития. 1.1.2. Особенности мощных импульсных генераторов, их характеристики и принципы построения. Накопители, умножители напряжения, коммутаторы, передающие линии. 1.1.3. Сильноточная электроника как физическая база импульсной энергетике. Механизм импульсного пробоя в вакууме, взрывная эмиссия электронов. 1.1.4. Генерирование сильноточных электронных пучков при взрывной эмиссии. Характеристики сильноточных электронных пучков. Сильноточные ускорители электронов.	2	0,055
2	<u>Тема 1.2. Применения импульсной энергетике и сильноточной электроники, мощных потоков заряженных частиц и плазмы</u> 1.2.1. Импульсный термоядерный синтез. 1.2.2. Исследования экстремальных состояний вещества. 1.2.3. Получение мощных импульсов мягкого и жесткого рентгеновского излучений. Импульсная радиография. 1.2.4. Генерирование мощных СВЧ-импульсов 1.2.5. Мощные импульсные газовые лазеры, накачиваемые сильноточными электронными пучками 1.2.6. Электронно-ионно-плазменные технологии	2	0,055
РАЗДЕЛ 2. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях		8	0,22
3	<u>Тема 2.1. Уравнения движения заряженной частицы</u>	2	0,055

	2.1.1. Уравнение движения релятивистской заряженной частицы в вакууме. Сила Лоренца. Уравнения движения в нерелятивистском случае. Полная и кинетическая энергия частицы, релятивистский импульс. 2.1.2. Осевая симметрия в сильноточных устройствах и пучках заряженных частиц. Скорость частицы в цилиндрической системе координат. Изменение единичных векторов при движении частицы. Проецирование уравнений движения на оси цилиндрической системы координат. Вид уравнений в общем и в нерелятивистском случае.		
4	<u>Тема 2.2. Движение заряженной частицы в постоянных однородных полях</u> 2.2.1. Движение в однородном электрическом поле. 2.2.2. Движение в однородном магнитном поле. Циклотронная частота. Прямое решение уравнений движения для циклотронного вращения. 2.2.3. Движение в скрещенных полях, разделение на компоненты по направлениям. Движение по циклоиде. Скорость дрейфа. Величина электрического поля в дрейфующей системе отсчета. Характер движения при различных соотношениях между напряженностями магнитного и поперечного электрического полей.	2	0,055
5	<u>Тема 2.3. Симметрии электромагнитного поля и законы сохранения</u> 2.3.1. Лагранжев метод описания механических систем. Обобщенные координаты и обобщенные скорости. Уравнения Эйлера-Лагранжа. Симметрия функции Лагранжа и определение интеграла движения. Функция Лагранжа для заряженной частицы в электромагнитном поле. 2.3.2. Обобщенный импульс. Трансляционная симметрия поля и сохранение проекции обобщенного импульса. 2.3.3. Осевая симметрия поля и сохранение аксиальной компоненты момента обобщенного импульса. Теорема Буша, формулировка через магнитный поток. 2.3.4. Постоянное поле и сохранение полной энергии частицы.	2	0,055
6	<u>Тема 2.4. Движение заряженной частицы в слабо неоднородном магнитостатическом поле</u> 2.4.1. Определение слабо неоднородного магнитостатического поля. Понятие адиабатического инварианта при движении системы с медленно изменяющимся параметром. 2.4.2. Адиабатический инвариант для движения в слабо неоднородного магнитного поля. 2.4.3. Магнитная пробка. Магнитные ловушки, их применение.	2	0,055
РАЗДЕЛ 3. Транспортировка сильноточных пучков заряженных частиц		6	0,17
7	<u>Тема 3.1. Транспортировка сильноточного пучка магнитным полем</u> 3.1.1. Стационарная модель осесимметричного пучка, направляемого однородным продольным магнитным полем. Баланс радиальных сил. 3.1.2. Использование теоремы Буша. Приближение нерелятивистского поперечного движения, однородного пучка, нулевого обобщенного момента: условие транспортировки. Плазменная электронная частота. 3.1.3. Транспортировка периодическим магнитным полем. Магнитный однулятор. Эффективная величина магнитного поля. Параметрический резонанс при периодической транспортировке. Применение ондуляторов.	2	0,055
8	<u>Тема 3.2. Магнитная изоляция и магнитная самоизоляция</u> 3.2.1. Передающие линии с изоляцией различных типов. Использование магнитного поля для изоляции вакуумных промежутков. 3.2.2. Одномерная модель в одночастичном приближении. Применение закона сохранения компоненты обобщенного импульса. Условие изоляции. 3.2.3. Изолирующий ток линии, его соотношение с током зарядки линии. 3.2.4. Условия возникновения магнитной самоизоляции. Скорость движения фронта магнитной самоизоляции. Магнитноизолированный поток как нестационарный объект.	2	0,055
9	<u>Тема 3.3. Предельный ток транспортировки трубчатого электронного пучка в однородном круглом канале.</u> 3.3.1. Одномерная стационарная модель трубчатого пучка с тонкой стенкой в сильном продольном магнитном поле. Использование закона сохранения энергии. 3.3.2. Потенциальная функция, ее максимум. Быстрое и медленное («сжатое») состояния электронного пучка, причина существования двух состояний. Условия образования «сжатого» состояния электронного пучка. 3.3.3. Предельный ток транспортировки трубчатого электронного пучка. 3.3.4. Отражение электронов при инъекции тока больше предельного. Понятие о виртуальном катоде.	2	0,055
Раздел 4. Формирование сильноточных электронных пучков		14	0,39
10	<u>Тема 4.1. Взрывная эмиссия электронов</u>	2	0,055

	4.1.1. Возможности мощных импульсных генераторов с точки зрения получения электронных потоков. 4.1.2. Токовые ограничения традиционных видов электронной эмиссии. 4.1.3. Взрывная электронная эмиссия, автоэмиссионный сценарий. Эмиссия электронов из плотной плазмы. Оценка для величины извлекаемого тока.		
11	<u>Тема 4.2. Формирование сильноточных электронных пучков, виды вакуумных диодов</u> 4.2.1. Вакуумные диоды без внешнего магнитного поля. Планарные диоды, их применения. 4.2.2. Коаксиальные диоды с магнитной изоляцией, магнетронные диоды, их применения. 4.2.3. Род-пинч диоды, их применение. 4.2.4. Особенности изготовления взрывоэмиссионных катодов.	2	0,055
12	<u>Тема 4.3. Плоский вакуумный диод</u> 4.3.1. Одномерная стационарная модель вакуумного диода с неограниченной катодной эмиссией. Уравнение движения и уравнение поля. 4.3.2. Выражение для тока в общем случае. 4.3.3. Нерелятивистский случай: ток Чайлда-Лэнгмюра. Ультрарелятивистский случай. Физическое объяснение полученных зависимостей тока от напряжения. 4.3.4. Время пролета частиц через вакуумный диод с неограниченной катодной эмиссией.	2	0,055
13	<u>Тема 4.4. Ток в сильноточных диодах с дискретной поверхностью эмиссии</u> 4.3.1. Гидродинамическая модель сильноточного электронного потока в нерелятивистском диоде. 4.3.2. Приведение системы уравнений и граничных условий к безразмерной форме. Определение токового форм-фактора. 4.3.3. Ток планарного диода с малым полусферическим эмиттером. Квазилинейность распределения потенциала. 4.3.4. «Закон трёх трёх вторых», пределы его применимости по напряжению.	2	0,055
14	<u>Тема 4.5. Условия постоянства импеданса вакуумного диода во времени</u> 4.4.1. Требования к стабильности импеданса сильноточных диодов. Причины зависимости тока сильноточных диодов от времени в наносекундном и микросекундном диапазоне времени. Макроскопическое расширение плазмы. 4.4.3. Рост числа эмиссионных центров. Микроскопическое расширение плазмы эмиссионных центров, эффект экранировки. 4.4.5. Условие постоянства импеданса сильноточного диода. Закон сохранения обобщенного импульса и баланс давлений, их выполнение на примере плоского диода со сплошной эмиссионной поверхностью. 4.4.6. Постоянство тока в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией. 4.4.7. Постоянство тока в планарном диоде с лезвийным катодом.	2	0,055
15	<u>Тема 4.6. Соотношение электрических и магнитных сил в диоде</u> 4.6.1. Модель осесимметричного пучка: оценка электрической и магнитной сил, действующих на граничный электрон. 4.6.2. Критерий необходимости учета влияния собственного магнитного поля пучка в нерелятивистском и ультрарелятивистском случаях. 4.6.3. Зарядовая нейтрализация сильноточного пучка. Токовая нейтрализация. Бессилового дрейф. 4.6.4. Сжатие сильноточного пучка, нейтрализованного по заряду, собственным магнитным полем. Критический ток Альфвена.	2	0,055
16	<u>Тема 4.7. Ток в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией</u> 4.7.1. Одномерная модель КДМИ с бесконечным продольным магнитным полем и трубчатым пучком с тонкой стенкой. 4.7.2. Использование закона сохранения энергии и закона сохранения обобщенного импульса. Потоки корпускулярного и полевого импульса в КДМИ. Тензор напряжений Максвелла. 4.7.3. Величина релятивистского фактора для пучка, формируемого в КДМИ, сравнение со случаем транспортировки предельного тока. 4.7.4. Ток Федосова, соотношение с предельным током транспортировки в нерелятивистском и ультрарелятивистском случаях.	2	0,055
РАЗДЕЛ 5. Электронные пучки с виртуальным катодом		4	0,11
17	<u>Тема 5.1. Токпрохождение в плоском эквипотенциальном промежутке</u> 5.1.1. Одномерная стационарная модель токпрохождения в эквипотенциальном вакуумном промежутке. 5.1.2. Однопоточный режим. Использование закона сохранения энергии. Потенциальная функция. Первый и второй критические токи. Зависимость минимальной кинети-	2	0,055

	ческой энергии электронов от величины тока. 5.1.3. Двухпоточный режим. Виртуальный катод. Диаграмма токопрохождения. Явления гистерезиса. 5.1.4. Соотношения для положения виртуального катода, инжектируемого и отраженного токов. 5.1.5. Пролетные времена для проходящих и отраженных частиц.		
18	<u>Тема 5.2. Релаксационные колебания объемного заряда</u> 5.2.1. Природа релаксационных колебаний в электронных потоках, роль процессов поглощения частиц. 5.2.2. Релаксационные колебания в процессе установления стационарного токопрохождения в нерелятивистском одномерном диоде с неограниченной катодной эмиссией при постоянном напряжении. Экранирующая величина заряда. Оценка для величины фронтального всплеска тока. Период колебаний и пролетное время. 5.2.3. Колебательные свойства потока с виртуальным катодом. Релаксационные колебания, связанные с пролетными и отраженными частицами, частоты этих колебаний, их зависимость от степени надкритичности тока инжекции. 5.2.3. Автоколебания, влияние разброса по энергии в инжектируемом пучке. Резонансные свойства потока с виртуальным катодом. 5.2.4. Виртуальный катод как токовый модулятор. Использование электронных пучков с виртуальным катодом для генерации СВЧ-колебаний.	2	0,055
	СУММАРНАЯ ТРУДОЕМКОСТЬ	36	1,0

2.3. Практические (семинарские) занятия

Порядковый номер занятия	Раздел, тема учебного курса, содержание практического (семинарского) занятия	Трудоемкость	
		час.	зач. ед.
1	2	4	5
РАЗДЕЛ 2. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях			
1	<u>Тема 2.1. Уравнения движения заряженной частицы</u> Получение уравнений движения заряженной частицы в цилиндрической системе координат. <u>Тема 2.2. Движение заряженной частицы в постоянных однородных полях</u> Прямое решение уравнений движения для циклотронного вращения в комплексном виде.	2	0,055
2	<u>Тема 2.3. Симметрии электромагнитного поля и законы сохранения</u> Получение интегралов движения для полей, обладающих различной симметрией. <u>Тема 2.4. Движение заряженной частицы в слабо неоднородном магнитостатическом поле.</u> Оценивание параметров магнитной ловушки.	2	0,055
РАЗДЕЛ 3. Транспортировка сильноточных пучков заряженных частиц			
3	<u>Тема 3.1. Транспортировка сильноточного пучка магнитным полем</u> Оценивание параметров магнитного поля, необходимых для периодической транспортировки пучка. Оценивание инкрементов параметрической неустойчивости при периодической транспортировке.	2	0,055
4	<u>Тема 3.2. Магнитная изоляция и магнитная самоизоляция</u> Оценивание параметров нагрузки, необходимых для самоизоляции коаксиальной линии. <u>Тема 3.3. Предельный ток транспортировки трубчатого электронного пучка в однородном круглом канале</u> Вычисление предельного тока транспортировки при конкретных параметрах задачи, оценивание влияния толщины стенки пучка на величину тока.	2	0,055
РАЗДЕЛ 4. Формирование сильноточных электронных пучков			
5	<u>Тема 4.1. Взрывная эмиссия электронов</u>	2	0,055

	Оценивание величины тока, извлекаемого из плазмы с заданными параметрами. Оценивание плотности предпробойного тока термоавтоэмиссии с катодного микроострия с учетом влияния объемного заряда.		
6	<u>Тема 4.2. Формирование сильноточных электронных пучков, виды вакуумных диодов</u> Оценивание параметров род-пинч диода. <u>Тема 4.3. Плоский вакуумный диод</u> Численное построение точного решения для тока в плоском вакуумном диоде, сравнение с нерелятивистской и ультрарелятивистской асимптотиками.	2	0,055
7	<u>Тема 4.4. Ток в сильноточных диодах с дискретной поверхностью эмиссии</u> Оценивание и сравнение тока в планарном диоде со сплошной и с дискретной поверхностью эмиссии. <u>Тема 4.5. Условия постоянства импеданса вакуумного диода во времени</u> Оценивание параметров лезвийной катодной поверхности, необходимой для обеспечения постоянства импеданса диода в течение заданного интервала времени.	2	0,055
8	<u>Тема 4.6. Соотношение электрических и магнитных сил в диоде</u> Оценивание соотношения электрических и магнитных сил в вакуумных диодах различной конфигурации при различных напряжениях. <u>Тема 4.7. Ток в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией</u> Вычисление тока коаксиального диода с магнитной изоляцией при конкретных параметрах задачи, оценивание возможного влияния величины магнитного поля на ток в диоде.	2	0,055
РАЗДЕЛ 5. Электронные пучки с виртуальным катодом			
9	<u>Тема 5.1. Токпрохождение в плоском эквипотенциальном промежутке</u> Оценивание первого и второго критического токов для заданных параметров задачи. <u>Тема 5.2. Релаксационные колебания объемного заряда</u> Оценивание частот колебания объемного заряда в диодах различной конфигурации.	2	0,055
СУММАРНАЯ ТРУДОЕМКОСТЬ		18	0,5

2.4. Самостоятельная работа аспирантов

Внеаудиторная самостоятельная работа аспирантов включает следующие виды деятельности:

- проработку учебного материала по конспектам лекций и учебной литературе; изучение и конспектирование источников из списка дополнительной учебной и научной литературы, обзорной литературы, включая интернет-источники;
- подготовку к практическим (семинарским) занятиям;
- решение задач по заданию преподавателя;
- подготовку реферата на тему, согласованную с преподавателем;
- выполнение коллективного задания проектно-исследовательского характера.

2.4.1. Решение задач

Примеры задач для самостоятельного решения:

1. Получить выражения, описывающие траекторию релятивистского движения заряженной частицы в однородном электростатическом поле.
2. Получить выражение для частоты циклотронного вращения электрона в релятивистском случае.
3. Применив преобразование Лоренца для электромагнитного поля, показать, что при движении заряженной частицы в скрещенных полях в системе отсчета, связанной с центром циклотронного вращения частицы, поперечное (по отношению к магнитному полю) электрическое поле отсутствует.
5. В плоский промежуток с приложенным напряжением U помещен заряд, в результате чего напряженность электрического поля на левом электроде обратилась в нуль. Решив однородную задачу, найти величину этого заряда (на единицу площади электродов) если (а) заряд сосредоточен вблизи левого электрода, (б) заряд распределен по промежутку равномерно.

6. Показать, что в нерелятивистском плоском диоде с током, соответствующим закону «трех вторых», величина заряда в зазоре на $1/3$ больше, чем на поверхности катода в промежутке без тока при том же приложенном напряжении.

7. Получить выражение для величины пролетного времени электрона в сильноточном плоском диоде. В нерелятивистском и ультрарелятивистском случаях сравнить это время с временем пролета одиночного электрона через свободный от заряда промежуток с тем же приложенным напряжением.

8. Выразить время пролета электронов через нерелятивистский плоский диод с током Чайлда—Лэнгмюра через плазменную частоту для электронов на аноде.

9. Показать, что частота релаксационных колебаний для потока отраженных электронов в эквипотенциальном промежутке с виртуальным катодом при большом превышении тока инжекции над критическим током пропорциональна корню квадратному из отношения тока инжекции к первому критическому току.

При решении задачи требуется:

- при необходимости доопределить задачу;
- выбрать подходящую математическую модель;
- произвести математические выкладки и получить результат;
- проанализировать результат и сделать практические выводы.

Представленное решение оценивается преподавателем по следующим критериям:

- насколько правильно выбраны подход к решению задачи и общая последовательность действий;

- правильно ли выбраны основные уравнения и формулы;

- правильны ли сделанные на их основе математические выкладки, верен ли конечный математический результат;

- насколько обоснован вывод из полученных выражений, насколько он ценен и отвечает ли он на вопрос задачи.

Максимальный балл за каждую задачу — 5,0 (максимум 1,0 по каждому критерию).

2.4.2. Подготовка реферата

Примеры тем для реферата:

1. Сильноточные электронные пучки в технологиях модификации материалов.

2. Сильноточные электронные пучки в технологиях стерилизации.

3. Применение сильноточных электронных пучков для генерации мощных импульсов СВЧ-излучения.

4. Применение сильноточных электронных пучков для генерации мощных импульсов рентгеновского излучения.

5. Применение сильноточных электронных пучков для накачки активных сред мощных импульсных газовых лазеров.

6. Интенсивные ионные пучки — генерация и применения.

7. Линии с магнитной самоизоляции — элемент мощных импульсных генераторов.

8. Открытые магнитные ловушки в физике и технике термоядерной плазмы.

Требования к реферату: объем не менее 40 тыс. печатных знаков. Число иллюстраций не менее 10. Число ссылок на использованные источники не менее 10. Ссылки на использованные источники обязательны. Общий объем заимствованного текста не более 25 % (реферат проверяется в системе «Антиплагиат»).

Критерии оценки реферата:

- полнота и разносторонность рассмотрения вопроса;

- число и качество использованных источников;

- изложение материала научным языком, отсутствие жаргона;

- наличие самостоятельных выводов, обобщающих сделанный обзор;

- изложение материала преимущественно своими словами (минимальный объем прямых текстовых заимствований). Отсутствие прямых заимствований без ссылки на источник.

Максимальный балл за реферат — 10 (максимум 2 по каждому критерию).

2.4.3. Выполнение коллективного задания проектно-исследовательского характера

Пример задания:

«Предложить и разработать конструкцию мощного импульсного СВЧ-генератора с виртуальным катодом (виркатора), принцип действия которого использует свойства виртуального катода как модулятора (фазового сепаратора) тока сильноточного электронного пучка. Требования к разрабатываемому устройству: частота генерации 2 ГГц; импульсная мощность генерации примерно 1 ГВт; для транспортировки электронного пучка не используется внешнее магнитное поле.

В ходе выполнения задания следует:

- изучить литературные источники, касающиеся виркаторов; выбрать тип виркатора из известных аналогов или предложить оригинальный вариант;
- оценить требуемые характеристики рабочего электронного пучка;
- выбрать тип и разработать вакуумный диод, выбрать тип катода и предложить его конструкцию;
- предложить конструкцию и определить характеристики электронно-волновой системы;
- выбрать необходимый тип и определить требуемые характеристики импульсного генератора для питания разрабатываемого устройства.

Критерии оценки выполнения коллективного задания:

- насколько использованный подход к решению задачи соответствует этой задаче и насколько он обоснован;
 - все ли необходимые для решения задачи; исходные данные учтены;
 - правильность математических выкладок;
 - наличие оригинальных находок при решении задачи;
 - обоснованность сделанных выводов;
 - степень практической осуществимости предложенного решения;
 - общая оценка результативности решения задачи: в какой мере удалось задачу решить.
- Максимальный балл — 14 (максимум по 2 по каждому из критериев).

2.4.4. 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 преподавателя.

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

2.4.5. База вопросов для самоконтроля при самостоятельной работе аспирантов

1. Записать систему уравнений Максвелла в вакууме.
2. Записать уравнение Пуассона для электростатического потенциала.
3. Записать уравнение непрерывности тока.
4. Записать выражение для компонент скорости частицы в цилиндрической системе координат.
5. Как преобразуются величины электрического и магнитного поля при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую?
6. Движение заряженной частицы описывается в цилиндрической системе координат. Как ведут себя единичные вектора при смещении заряженной частицы?
7. Записать уравнения Эйлера—Лагранжа:
8. Что такое интеграл движения?
9. Какая величина сохраняется при движении заряженной частицы в электромагнитном поле, обладающем симметрией сдвига?
10. Что является интегралом движения при движении заряженной частицы в осесимметричном электромагнитном поле?

11. Какая величина сохраняется при движении заряженной частицы в постоянном электромагнитном поле?
12. Как частица движется в однородном постоянном электрическом поле?
13. Записать выражение для частоты циклотронного вращения частицы в релятивистском случае.
14. Чему равна величина дрейфовой скорости при движении в скрещенных полях?
15. Что представляет собой нерелятивистское движение заряженной частицы в скрещенных полях при условии $E_{\perp} < H$?
16. Какое магнитное поле мы называем слабо неоднородным (применительно к движению в нем заряженной частицы)?
17. Записать выражения для адиабатического инварианта в общем виде.
18. Записать величину адиабатического инварианта при движении заряженной частицы в слабо неоднородном магнитостатическом поле (с точностью до постоянного коэффициента)
19. Что такое магнитная пробка и магнитная ловушка, на чем основано их действие?
20. Каковы величины собственных электрического и магнитного полей на внешней границе осесимметричного электронного пучка радиуса R с током I и продольной скоростью частиц v ?
21. Записать условие транспортировки сплошного однородного пучка электронов с релятивистским фактором γ однородным магнитным полем
22. Если амплитуда периодического магнитного поля равна H , то какова его эффективная величина с точки зрения транспортировки пучка заряженных частиц?
23. Что такое параметрический резонанс? При каких условиях при транспортировке электронного пучка пространственно-периодическим магнитным полем в пучке возможна параметрическая резонансная раскачка поперечных колебаний?
24. Записать выражение для баунс-частоты.
25. Что такое ондулятор, для чего он используется?
26. Достоинства и недостатки транспортировки пучков пространственно-периодическим полем.
27. Что такое взрывная эмиссия электронов, каков ее механизм, в чем принципиальное отличие от других видов эмиссии?
28. Чем определяется максимальная плотность электронного тока, которая может быть извлечена из плазмы?
29. Основные виды сильноточных диодов, их особенности, области применения.
30. Какие поля играют важнейшую роль в формировании электронного пучка в КДМИ?
31. Какие поля играют важнейшую роль в формировании электронного пучка в род-пинч диоде?
32. Сформулировать допущения одномерной стационарной модели плоского вакуумного диода.
33. Какие уравнения, с какими граничными условиями решаются в этой модели?
34. Записать выражение для плотности тока в нерелятивистском плоском диоде.
35. Записать выражение для плотности тока в ультрарелятивистском плоском диоде.
36. Почему в нерелятивистском случае плотность тока плоского диода пропорциональна напряжению в степени $3/2$, а в ультрарелятивистском случае — напряжению в первой степени?
37. Какие существуют причины для изменения тока вакуумного диода во времени при постоянном напряжении?
38. Какова характерная скорость расширения взрывоэмиссионной плазмы?
39. В чем сущность перевода системы уравнений для электронного потока в вакуумном диоде в безразмерную форму? Что достигается таким переводом?
40. Записать выражения для токового форм-фактора сильноточного вакуумного диода произвольной конфигурации.
41. Что произойдет с током нерелятивистского вакуумного сильноточного диода если все его размеры увеличить в k раз?

42. Записать выражения для тока планарного диода с зазором D , полусферическим эмиттером радиуса $R \ll D$ на катоде и приложенным напряжением U . В каком диапазоне ускоряющих напряжений оно справедливо и почему?
43. Какого типа взрывоэмиссионный катод наиболее целесообразно использовать в вакуумном диоде для получения электронного пучка с постоянным током в наносекундном диапазоне времени? Чем обеспечивается постоянство тока?
44. В каких случаях в нерелятивистском вакуумном диоде необходимо учитывать влияние собственного магнитного поля тока на движение электронов?
45. В каких случаях в релятивистском вакуумном диоде можно пренебречь влиянием собственного магнитного поля тока на движение электронов?
46. Что такое нейтрализация пучка по заряду? По току? Чем они достигаются? Что такое бессилового дрейф?
47. Что такое критический ток Альфвена, от чего зависит его величина, какова физическая причина существования этого критического тока?
48. Какие уравнения, с какими граничными условиями решаются в одномерной стационарной модели токопрохождения через плоский эквипотенциальный промежуток?
49. Что такое первый и второй критические токи?
50. Что такое виртуальный катод?
51. В чем заключается явление гистерезиса при токопроходе в плоском эквипотенциальном промежутке?
52. Как изменяется положение виртуального катода в плоском эквипотенциальном промежутке при неограниченном увеличении тока инжекции?
53. Как ведет себя величина проходящего тока в плоском эквипотенциальном промежутке при неограниченном увеличении тока инжекции?
54. Что такое релаксационные колебания?
55. Чем определяется частота релаксационных колебаний, возникающих в процессе установления тока в нерелятивистском плоском диоде?
56. Как зависит частота релаксационных колебаний для потока отраженных электронов при большой надкритичности тока инжекции от величины последнего?
57. Как влияет разброс электронов по энергии инжекции на амплитуду автоколебаний виртуального катода в одномерной модели?
58. Сохранение каких физических величин используется при определении предельной величины тока транспортировки пучка в канале дрейфа? Сформулировать приближения использованной модели.
59. Чем определяется предельный ток транспортировки замагниченного трубчатого электронного пучка в однородной круглой трубе дрейфа?
60. Почему трубчатый электронный пучок с заданным током, направляемый сильным магнитным полем, может находиться в однородном канале транспортировки в двух состояниях, различающихся скоростью частиц и плотностью заряда?
61. Записать выражение для релятивистского фактора электронов, соответствующего предельному току транспортировки.
62. Сохранением каких физических величин следует воспользоваться при решении задачи о токе коаксиального диода с магнитной изоляцией? Сформулировать допущения использованной модели.
63. Почему поток обобщенного импульса через кромку катода в рассмотренной нами модели КДМИ равен нулю?
64. Записать выражение для релятивистского фактора электронов пучка, сформированного в КДМИ.
65. Как соотносится ток Федосова с предельным током транспортировки при заданных радиусах электронного пучка (катода КДМИ) и трубы дрейфа (анода КДМИ)?
66. Что такое магнитная изоляция? Чем она достигается?
67. Что такое изолирующий ток, от чего он зависит?
68. Как соотносится изолирующий ток линии с ее током зарядки?

69. Записать выражение для скорости движения фронта магнитной самоизоляции.
70. Записать выражение для критического тока изоляции линии в одноэлектронном приближении.
71. Сформулировать допущения одномерной модели волн объемного заряда. Какие уравнения и каким методом решаются в этой модели?
72. Записать выражение для фазовой скорости медленной и быстрой волн объемного заряда.
73. Записать выражение для групповой скорости медленной и быстрой волн объемного заряда.
74. К какому типу волн принадлежат волны объемного заряда?

3. Учебно-методические материалы

3.1. Основная и дополнительная литература

а) основная литература:

1. Беломытцев С. Я., Пегель И. В. Физика сильноточных пучков заряженных частиц. Учебное пособие. – Томск: Издательство ТПУ, 2008. – 115 с.
2. Кирштейн П, Кайно Г., Уотерс У. Формирование электронных пучков. – М., Мир, 1979.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. I. Механика. М.: Наука, 1988. – 215 с.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. II. Теория поля. М.: Наука, 1988. – 509 с.
5. Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц. М. Мир, 1980.
6. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. – М.: Мир, 1984. – 431 с.
7. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
8. Рухадзе А.А., Богданкевич Л.С., Росинский С.Е., Рухлин В.Г. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков. М.: Атомиздат, 1981. – 164 с.

б) дополнительная литература:

1. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Советское радио, 1966. – 466 с.
2. Беломытцев С. Я., Коровин С. Д., Пегель И. В. Ток в сильноточном планарном диоде с дискретной эмиссионной поверхностью // ЖТФ. – 1999. – Т. 69. – В. 6. – С. 97—101.
3. Беломытцев С. Я., Литвинов Е. А., Месяц Г. А., Федосов А. И. Характеристики электронного пучка, формируемого в диоде с магнитной изоляцией // Физика плазмы. – 1981. – Т. 7. – В. 1. – С. 86—90.
4. Бугаев С. П., Зайцев Н. И., Ким А. А., Кошелев В. И., Федосов А. И., Фукс М. И. Процессы в диодах с магнитной изоляцией, использующих взрывную эмиссию электронов / в кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. В. 2. Проблемы повышения мощности и частоты излучения. – Горький: ИПФ АН СССР, 1981. – С. 37.
5. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Мощные ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
6. Гвоздовер З. Д. Теория электронных приборов сверхвысоких частот. – М: Гостехтеориздат, 1956. – 527 с.
7. Генерирование длинноимпульсных сильноточных электронных пучков/ Василевский М.А., Ройфе И.М., Энгелько В.И. – В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 3. – Горький: ИПФ АН СССР, 1983, с. 184—203.
8. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение, Атомиздат, 1977.

9. Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В. Эмиссионная электроника. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1966. – 564 с.
10. 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.
11. Мейлинг В. Стари Ф. Наносекундная импульсная техника. М.: Атомиздат. - 1973. – 384 с.
12. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. – 704 с.
13. Месяц Г. А., Пегель И. В. Введение в наносекундную импульсную энергетiku и электронику (курс лекций для физиков и инженеров). – М.: ФИАН, 2009. – 192 с.
14. Москалев В.А. Сергеев Г.И. Измерение параметров пучков заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 237 с.
15. Нечаев В. Е. Аналитическая теория формирования трубчатых электронных пучков различной толщины в сильноточных коаксиальных диодах с магнитной изоляцией // Известия вузов. Радиофизика. – 1991. – Т. 34. – № 9. – С. 1027—1039.
16. Пирс Дж. П. Теория и расчет электронных пучков. М., Сов. Радио, 1956.
17. Пространственно-временные характеристики РЭП А.Ф. Александров, С.Ю. Галузо, Н.И. Зайцев, В.И. Кошелев, П.С. Стрелков, А.В. Федотов, А.Г. Шкварунец, М.Ю. Шмелев. В.И. Энгелько. – В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 5. – Горький: ИПФ АН СССР, 1988, с. 163—182.
18. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии / под ред. Г. А. Месяца. – Новосибирск: Наука, 1983. – 168 с.
19. Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Том 1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 496 с.
20. Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Том 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 648 с.
21. Федосов А. И., Литвинов Е. А., Беломытцев С. Я., Бугаев С. П. К расчету характеристик электронного пучка, формируемого в диодах с магнитной изоляцией // Известия вузов. Физика. – 1977. – № 10. – С. 134—135.
22. Формирование сильноточных релятивистских электронных пучков для мощных генераторов и усилителей СВЧ. С.П. Бугаев, В.П. Ильин, В.И. Кошелев, Г.А. Месяц, В.Е. Нечаев, Ю.П. Усов, М.И. Фукс, Б.Н. Яблоков. – В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 1. – Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 5—75.

4. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- аудиторный фонд ИСЭ СО РАН,
- средства мультимедиа,
- рабочее место аспиранта с выходом в Интернет,
- библиотечный фонд ИСЭ СО РАН.

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
Промежуточные тесты (по разделам дисциплины), суммарно	12

Итоговый тест	15
Подготовка реферата (самостоятельная работа)	10
Решение задач на практических (семинарских) занятиях	18
Решение задач (самостоятельная работа)	18
Выполнение коллективного задания проектно-исследовательского характера (самостоятельная работа)	7
Дифференцированный зачет	20
Максимальный суммарный балл	100

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

«Отлично»: 16—20 баллов.

«Хорошо»: 11—15 баллов.

«Удовлетворительно»: 6—10 баллов.

«Неудовлетворительно»: 5 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
Промежуточные тесты (по разделам дисциплины)	+	+	+			
Итоговый тест	+	+	+			
Подготовка реферата (самостоятельная работа)	+	+	+	+		
Решение задач (на практических (семинарских) занятиях)	+	+	+		+	+
Решение задач (самостоятельная работа)	+	+	+		+	
Выполнение коллективного задания проектно-исследовательского характера (самостоятельная работа)	+	+	+	+	+	+
Дифференцированный зачет	+	+	+	+		

5.3. База вопросов для составления промежуточных и итогового тестов

Для составления каждого из промежуточных тестов (по итогам освоения разделов дисциплины) используются вопросы, относящиеся к изучаемому разделу. Итоговый тест содержит все имеющиеся в базе вопросы. Вопросы в тесте каждому обучающемуся даются в индивидуальном случайном порядке.

Балл за тест, получаемый обучающимся, вычисляется путем нормирования суммарного числа правильных ответов таким образом, чтобы максимальный балл за все промежуточные тесты и максимальный балл за итоговый тест соответствовали величинам, указанным в таблице п. 5.1.

1. Система уравнений Максвелла для электрического и магнитного полей в вакууме имеет вид:

$$\begin{array}{l}
 \text{(A)} \left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} \mathbf{E} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} \\ \operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho \\ \operatorname{div} \mathbf{H} = 0. \end{array} \right. \quad \text{(Б)} \left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} \\ \operatorname{div} \mathbf{E} = 0 \\ \operatorname{div} \mathbf{H} = 4\pi\rho. \end{array} \right. \\
 \text{(B)} \left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \mathbf{E} = -\nabla\varphi \\ \operatorname{div} \mathbf{H} = 0. \end{array} \right. \quad \text{(Г)} \left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} \\ \operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho \\ \operatorname{div} \mathbf{H} = 0. \end{array} \right.
 \end{array}$$

2. Уравнение Пуассона для электростатического потенциала имеет вид:

$$\begin{array}{ll}
 \text{(A)} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{j} = 0 & \text{(Б)} \Delta \varphi = -4\pi\rho \\
 \text{(B)} \nabla \varphi = -4\pi\rho & \text{(Г)} \nabla \varphi = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \\
 \text{(Д)} \mathbf{E} = -\Delta \varphi & \text{(E)} \mathbf{E} = -\nabla \varphi
 \end{array}$$

3. Как преобразуются наблюдаемые величины электрического и магнитного поля при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую?

- (А) В случае релятивистского взаимного движения систем отсчета поперечные компоненты электрического поля переходят в продольные компоненты магнитного поля, и наоборот.
 (Б) Продольные (по отношению к направлению взаимного движения систем отсчета) компоненты полей изменяются по определенному закону, поперечные — сохраняются.
 (В) Продольные (по отношению к направлению взаимного движения систем отсчета) компоненты полей сохраняются, поперечные — изменяются по определенному закону.

4. Указать правильное выражение для азимутальной компоненты скорости частицы в цилиндрической системе координат.

(А) $v_\varphi = \dot{\varphi}$

$$(Б) v_{\varphi} = r\dot{\varphi}$$

$$(В) v_{\varphi} = \frac{1}{r} \frac{d}{dt} (r^2 \dot{\varphi})$$

5. Движение заряженной частицы описывается в цилиндрической системе координат. Как ведут себя единичные вектора \hat{e}_r , \hat{e}_{φ} , \hat{e}_z при смещении заряженной частицы по всем трем направлениям?

(А) Вектора \hat{e}_r и \hat{e}_{φ} изменят свое направление, а вектор \hat{e}_z изменится по абсолютной величине.

(Б) Все три вектора \hat{e}_r , \hat{e}_{φ} , \hat{e}_z постоянны.

(В) Вектор \hat{e}_z постоянен, а вектора \hat{e}_r , \hat{e}_{φ} изменят свое направление.

5. Указать правильную запись для уравнений Эйлера—Лагранжа:

$$(А) \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = \frac{\partial L}{\partial q_i}, \quad (Б) \frac{d}{dq_i} \left(\frac{\partial L}{\partial t} \right) = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i},$$

$$(В) \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = \frac{\partial L}{\partial q_i}, \quad (Г) \frac{\partial^2 L}{\partial q_i \partial \dot{q}_i} = \frac{dL}{dt}.$$

6. Какая величина называется интегралом движения?

(А) Результат интегрирования уравнений Эйлера-Лагранжа.

(Б) Сохраняющаяся величина, соответствующая движению частицы в полях с определенной симметрией.

(В) Результат интегрирования уравнений движения, выраженный через обобщенные координаты и обобщенные скорости.

7. Какая величина сохраняется при движении заряженной частицы в электромагнитном поле, обладающем симметрией сдвига?

(А) Z-компонента момента обобщенного импульса частицы.

(Б) Величина проекции обобщенного импульса частицы на направление, соответствующее симметрии.

(В) Величина проекции механического импульса частицы на направление, соответствующее симметрии.

(Г) При движении в таком поле определить интеграл движения невозможно.

8. Что является интегралом движения при движении заряженной частицы в осесимметричном электромагнитном поле?

(А) Z-компонента обобщенного импульса частицы.

(Б) Аксиальная компонента момента обобщенного импульса частицы.

(В) Поток магнитного поля через круговое сечение, ограниченное радиус-вектором частицы.

(Г) Поток электрического поля через круговое сечение, ограниченное радиус-вектором частицы.

(Д) При движении в таком поле определить интеграл движения невозможно.

9. При движении заряженной частицы в постоянном электромагнитном поле сохраняется

(А) Обобщенная энергия частицы.

- (Б) Сумма кинетической энергии и потенциальной энергии частицы.
- (В) Потенциальная энергия частицы.
- (Г) Работа, совершаемая над частицей электрическим полем.

10. Указать правильную запись для релятивистской величины циклотронной частоты по модулю:

- (А) $\frac{eE}{mc\gamma}$
- (Б) $\frac{eH}{mc\gamma}$
- (В) $\frac{eH}{mc^2}$
- (Г) $\frac{c[\mathbf{E} \times \mathbf{H}]}{\gamma H^2}$
- (Д) $\frac{eH}{mc^2\gamma}$
- (Е) $\frac{cE}{mc^2\gamma}$

11. Указать правильную запись для величины дрейфовой скорости частицы при движении в скрещенных полях:

- (А) $c \frac{[\mathbf{E} \times \mathbf{H}]}{H}$
- (Б) $c \frac{(\mathbf{E}\mathbf{H})}{H^2}$
- (В) $c \frac{[\mathbf{E} \times \mathbf{H}]}{E^2}$
- (Г) $e \frac{[\mathbf{E} \times \mathbf{H}]}{H^2}$
- (Д) $c \frac{[\mathbf{E} \times \mathbf{H}]}{E}$
- (Е) $c \frac{[\mathbf{E} \times \mathbf{H}]}{H^2}$

12. Нерелятивистское движение заряженной частицы в скрещенных полях при условии $E_{\perp} < H$ представляет собой

- (А) Равноускоренное движение в направлении магнитного поля и циклотронное вращение в плоскости, нормальной к магнитному полю.
- (Б) Равноускоренное движение в направлении магнитного поля и движение по циклоиде в плоскости, нормальной к магнитному полю.
- (В) Равноускоренное движение в направлении электрического поля и циклотронное вращение в плоскости, нормальной к электрическому полю.
- (Г) Дрейф с постоянной скоростью в направлении магнитного поля и движение по цепной линии в плоскости, нормальной к магнитному полю.
- (Д) Равноускоренное движение в направлении магнитного поля и суперпозицию равномерного вращения и поступательного дрейфа в плоскости, нормальной к магнитному полю.
- (Е) Движение по спирали.
- (Ж) Суперпозицию движения по циклоиде и поступательного дрейфа.

13. Адиабатический инвариант при движении заряженной частицы в магнитостатическом поле определяется, если

- (А) Радиус циклотронного вращения частицы мал по сравнению с шагом циклотронной спирали.
- (Б) Циклотронный радиус и шаг циклотронной спирали малы.
- (В) Магнитное поле на траектории частицы при ее смещении за один период циклотронного вращения период изменяется слабо.

14. Величина адиабатического инварианта при движении заряженной частицы в слабо неоднородном магнитостатическом поле равна

- (А) $\frac{1}{2\pi} \oint_{\Gamma} p dq$, где p — обобщенный импульс частицы, q — ее обобщенный заряд.
- (Б) $\frac{1}{2\pi} \oint_{\Gamma} p dq$, где p — релятивистский импульс частицы, q — ее обобщенная координата.
- (В) $\frac{1}{2\pi} \oint_{\Gamma} \mathbf{P} d\mathbf{q}$, где \mathbf{P} — обобщенный импульс частицы в плоскости квазициклического движения, \mathbf{q} — вектор обобщенных координат.
- (Г) $\frac{1}{2\pi} \oint_{\Gamma} P dq$, где P — давление магнитного поля в нормальной плоскости, q — обобщенная координата частицы.

15. Величина адиабатического инварианта при движении заряженной частицы в слабо неоднородном магнитостатическом поле, с точностью до постоянного коэффициента, равна...

- (А) $p_{\perp} H^2$ (Б) $p_{\perp}^2 H$ (В) $p H^2$ (Г) p^2 / H
 (Д) $p^2 H$ (Е) $p_{\parallel}^2 H$ (Ж) p_{\parallel} / H^2 (З) $p_{\parallel} H^2$
 (И) p_{\parallel}^2 / H (К) p_{\perp}^2 / H (Л) p / H^2 (М) p_{\perp} / H^2

16. При движении заряженной частицы в неоднородном магнитостатическом поле у нее сохраняется ...

- (А) величина циклотронного радиуса.
 (Б) поперечная скорость.
 (В) кинетическая энергия.
 (Г) потенциальная энергия.
 (Д) кинетическая энергия поперечного движения.
 (Е) кинетическая энергия продольного движения.
 (Ж) поперечный импульс.
 (З) продольный импульс.
 (И) сумма поперечного и продольного импульсов.
 (И) Не сохраняется ни одна из перечисленных величин.

17. Каковы величины собственных электрического и магнитного полей на внешней границе осесимметричного электронного пучка радиуса R с током I и продольной скоростью частиц v ?

- (А) $E_r = 2I/Rc$, $E_{\phi} = 0$, $E_z = 0$, $H_r = 2I/Rv$, $H_{\phi} = 0$, $H_z = 0$.
 (Б) $E_r = 0$, $E_{\phi} = 0$, $E_z = 2I/Rc$, $H_r = 2I/Rv$, $H_{\phi} = 0$, $H_z = 0$.
 (В) $E_r = 2I/Rc$, $E_{\phi} = IR$, $E_z = 0$, $H_r = 0$, $H_{\phi} = 2I/Rv$, $H_z = 0$.
 (Г) $E_r = 0$, $E_{\phi} = 2I/Rc$, $E_z = 0$, $H_r = IRv$, $H_{\phi} = 0$, $H_z = 0$.
 (Д) $E_r = 2I/Rv$, $E_{\phi} = 0$, $E_z = 0$, $H_r = 0$, $H_{\phi} = 2I/Rc$, $H_z = 0$.
 (Е) $E_r = 2I/Rv$, $E_{\phi} = 0$, $E_z = 0$, $H_r = 0$, $H_{\phi} = -I/Rc$, $H_z = 0$.
 (Ж) $E_r = 2I/Rv$, $E_{\phi} = 0$, $E_z = 0$, $H_r = 0$, $H_{\phi} = 0$, $H_z = 2I/Rc$.

18. Условие транспортировки сплошного однородного пучка электронов с релятивистским фактором γ однородным магнитным полем имеет вид:

- (А) $\omega_H \leq \omega_e \sqrt{2/\gamma^3}$, где $\omega_e = \sqrt{4\pi n e^2 / m}$ — электронная плазменная частота, ω_H — циклотронная частота.

- (Б) $\omega_H \geq \sqrt{2\omega_e/\gamma^3}$, где $\omega_e = \sqrt{4\pi n^2 e/m}$ — электронная плазменная частота, ω_H — циклотронная частота.
- (В) $\omega_e \leq \sqrt{2/\gamma^3} \omega_H$, где $\omega_e = \sqrt{4\pi n^2 e/m}$ — электронная плазменная частота, ω_H — циклотронная частота.
- (Г) $\omega_H \geq \sqrt{8\pi n^2 e/m\gamma^3}$, где ω_H — циклотронная частота.
- (Д) $\omega_H \geq \sqrt{2/\gamma^3} \Omega_b$, где ω_H — циклотронная частота, Ω_b — баунс-частота.

19. Если амплитуда периодического магнитного поля равна H , то его эффективная величина с точки зрения транспортировки пучка заряженных частиц составляет

- (А) $H/2$ (Б) $2H$ (В) $2^{-1/2} H$ (Г) $2^{1/2} H$
 (Д) $\sqrt{2H}$ (Е) $\sqrt{H/2}$ (Ж) $H^2/2$ (З) H

20. При каких условиях при транспортировке электронного пучка пространственно-периодическим магнитным полем в пучке возможна параметрическая резонансная раскачка поперечных колебаний?

- (А) При кратности баунс-частоты эффективной величине циклотронной частоты.
 (Б) При кратности эффективной величины циклотронной частоты электронной плазменной частоте.
 (В) При кратности эффективной величины циклотронной частоты баунс-частоте.
 (Г) При кратности баунс-частоты электронной плазменной частоте.

21. Указать наиболее верное определение взрывной электронной эмиссии:

- (А) Автоэлектронная эмиссия, интенсивность которой многократно возрастает вследствие усиления электрического поля на микронеоднородностях катода.
 (Б) Мощная термоавтоэлектронная эмиссия, возникающая при разогреве материала микроострий на катоде протекающим током.
 (В) Способ получения электронных пучков с экстремально высокими токами, основанный на применении специальных взрывчатых веществ с большой плотностью электронов.
 (Г) Комплекс явлений на катоде вакуумного промежутка, происходящих при быстром приложении высокого напряжения и приводящий к взрывному образованию плотной плазмы и извлечению из нее электронного тока с величиной, ограниченной собственным объемным зарядом.
 (Д) Эмиссия электронов из плотной плазмы в условиях большой напряженности электрического поля на ее поверхности.

22. Какие поля играют важнейшую роль в формировании электронного пучка в КДМИ?

- (А) Внешнее продольное магнитное поле, электрическое поле импульса напряжения.
 (Б) Внешнее продольное магнитное поле, электрическое поле объемного заряда и импульса напряжения, магнитное поле Земли.
 (В) Внешнее продольное магнитное поле, электрическое поле объемного заряда и импульса напряжения.
 (Г) Магнитное поле электронного тока, электрическое поле объемного заряда.

23. Какие поля играют важнейшую роль в формировании электронного пучка в род-пинч диоде?

- (А) Внешнее продольное магнитное поле, электрическое поле объемного заряда.
 (Б) Внешнее продольное магнитное поле, электрическое поле объемного заряда и импульса напряжения.
 (В) Магнитное поле электронного тока, электрическое поле высоковольтного электромагнитного импульса и объемного заряда.

24. Плотность тока в нерелятивистском плоском диоде при неограниченной катодной эмиссии равна...

(А) $\frac{\sqrt{2}}{9\pi D^2} \sqrt{\frac{e}{m}} U^{2/3}$ (Б) $\frac{\sqrt{2}}{9\pi D} \sqrt{\frac{e}{m}} U^{3/2}$ (В) $\frac{\sqrt{2}}{9\pi D^2} \sqrt{\frac{eU^3}{m}}$
 (Г) $\frac{\sqrt{2}}{9\pi D^2} \sqrt{\frac{e}{m}} U$ (Д) $\frac{9}{\pi D^2} \sqrt{\frac{2m}{e}} U^{3/2}$ (Е) $\frac{\sqrt{2}}{9\pi D^2} I_0 (\Gamma - 1)^{3/2}$

25. Плотность тока в ультрарелятивистском плоском диоде при неограниченной катодной эмиссии равна...

(А) $\frac{I_0 \Gamma}{2\pi D^2}$ (Б) $\frac{I_0 (\Gamma - 1)^{3/2}}{2\pi D^2}$ (В) $\frac{I_0 \Gamma}{2\pi D}$ (Г) $\frac{(\Gamma - 1)^{3/2}}{2\pi D^2}$
 (Д) $\frac{eU}{2\pi D^2}$ (Е) $\frac{cU}{2\pi D^2}$ (Ж) $\frac{cU^{3/2}}{2\pi D^2}$ (З) $\frac{cU^{3/2}}{2\pi D}$

26. Какова характерная скорость расширения взрывоэмиссионной плазмы?

- (А) В начальные моменты времени эта скорость приближается к скорости света.
 (Б) Несколько сантиметров за микросекунду.
 (В) Порядка 10^8 см/с.
 (Г) Порядка 10^9 см/с.

27. Форм-фактор для сильноточного вакуумного диода произвольной конфигурации записывается как...

(А) $\int_{\tilde{S}} \tilde{\mathbf{j}}(\tilde{\mathbf{r}}) d(\mathbf{n}\tilde{S})$, где $\tilde{\mathbf{j}}$ — нормированная безразмерная плотность электронного тока, \mathbf{n} — положительная нормаль к поверхности, а интеграл в нормированных безразмерных координатах берется по любому сечению, включающему поперечное сечение пучка.

(Б) $\int_{\tilde{S}} \tilde{j}_n(\tilde{\mathbf{r}}) d\tilde{S}$, где \tilde{j}_n — нормальная компонента нормированной безразмерной плотности электронного тока, а интеграл в нормированных безразмерных координатах берется по любому сечению, включающему поперечное сечение пучка.

(В) $\int_S \mathbf{j}(\mathbf{r}) d\mathbf{S}$, где \mathbf{j} — плотность тока электронов, а поверхностный интеграл берется по поперечному сечению пучка.

(Г) $\int_S \sigma \mathbf{E}(\mathbf{r}) d\mathbf{S}$, где σ — поверхностная плотность заряда, \mathbf{E} — напряженность электрического поля, а интеграл берется по любой поверхности на катоде, включающей эмиссионную поверхность.

28. Что произойдет, если все размеры нерелятивистского вакуумного сильноточного диода увеличить в k раз, не изменяя величины приложенного напряжения?

- (А) Ток диода уменьшится в k раз.
 (Б) Ток диода увеличится в k раз.
 (В) Ток диода уменьшится в $k^{3/2}$ раз.
 (Г) Ток диода увеличится в $k^{3/2}$ раз.
 (Д) Ток диода не изменится.

29. В системе СГС ток планарного диода с зазором D , полусферическим эмиттером радиуса $R \ll D$ на катоде и приложенным напряжением U приблизительно равен ...

- (А) $0.5\sqrt{e/m}(U/R)^{3/2}$ (Б) $0.5\sqrt{e/m}(RU/D)^2$
 (В) $0.5\sqrt{e/m}(DU/R)^{3/2}$ (Г) $0.5\sqrt{e/m}(RU/D)^{3/2}$
 (Д) $0.5\sqrt{e/m}(R/D)^2 U^{3/2}$ (Е) $0.5\sqrt{e/m}(R/D)^{3/2} U$

30. Какого типа взрывоэмиссионный катод наиболее целесообразно использовать в вакуумном диоде для получения электронного пучка с постоянным током в наносекундном диапазоне времени?
- (А) Катод с эмиссионной поверхностью в виде периодически расположенных длинных тонких острий.
 (Б) Катод с эмиссионной поверхностью в виде периодически расположенных тонких лезвий.
 (В) Катод с максимально ровной поверхностью.
 (Г) Катод с эмиссионной поверхностью в виде периодически расположенных полусферических эмиттеров.
 (Д) Катод с эмиссионной поверхностью в виде периодически расположенных полуцилиндрических эмиттеров.
 (Е) Катод с эмиссионной поверхностью в виде гексагональной периодической структуры.
31. В вакуумном планарном диоде с катодом, имеющим периодически расположенные вертикальные тонкие лезвия (высокие по сравнению с расстоянием между ними) с кромками, покрытыми плазмой, ...
- (А) Давление электрического поля на катод и на анод одинаково.
 (Б) Давление электронного пучка на катод и на анод одинаково.
 (В) Давление электрического поля на анод равно нулю.
 (Г) Давление электрического поля на катод равно нулю.
 (Д) Давление пучка на анод равно нулю.
 (Е) Давление пучка на катод равно нулю.
 (Ж) На катоде давление электронного пучка равно давлению электрического поля.
 (З) На аноде давление электронного пучка равно давлению электрического поля.
32. В нерелятивистском вакуумном диоде необходимо учитывать влияние собственного магнитного поля тока на движение электронов, если...
- (А) радиус электронного пучка R много меньше зазора в диоде D .
 (Б) радиус пучка по величине близок к зазору в диоде.
 (В) величина D/R меньше величины напряжения, измеренной в мегавольтах, или близка к ней.
33. В релятивистском вакуумном диоде можно пренебречь влиянием собственного магнитного поля тока на движение электронов, если...
- (А) радиус электронного пучка R много меньше зазора в диоде D .
 (Б) радиус пучка по величине близок к зазору в диоде.
 (В) радиус пучка намного превышает зазор в диоде.
34. Движение сильноточного пучка называется бессиловым дрейфом, если...
- (А) пучок полностью нейтрализован по объемному заряду.
 (Б) пучок полностью нейтрализован по току.
 (В) пучок полностью нейтрализован по объемному заряду и по току.
 (Г) сила сжатия со стороны собственного магнитного поля тока в точности уравновешивается центробежной силой.
 (Д) сила сжатия со стороны собственного магнитного поля тока в точности уравновешивается кулоновской силой расталкивания.
35. Ток Альфвена — это...

- (А) величина тока однородного по плотности цилиндрического электронного пучка, транспортируемого внешним магнитным полем, при достижении которой сила, действующая на граничный электрон пучка со стороны внешнего магнитного поля, полностью уравнивается силой со стороны собственного магнитного поля тока.
- (Б) величина тока однородного по плотности цилиндрического электронного пучка, при достижении которой сжатие пучка собственным магнитным полем, при условии нейтрализации пучка по заряду, препятствует его распространению.
- (В) величина тока однородного по плотности цилиндрического электронного пучка, при достижении которой кулоновское расталкивание пучка собственным электрическим полем, при условии нейтрализации пучка по току, препятствует его распространению.
- (Г) критическая величина тока однородного по плотности цилиндрического электронного пучка, при достижении которой кулоновское расталкивание полностью компенсируется сжатием собственным магнитным полем тока.

36. В одномерной модели токопрохождения через плоский эквипотенциальный промежуток первый критический ток — это...

- (А) та величина тока инжекции, при которой происходит образование виртуального катода.
- (Б) та величина тока инжекции, при которой происходит исчезновение виртуального катода.
- (В) разность между инжектируемым током и проходящим током.
- (Г) разность между инжектируемым током и отраженным током.
- (Д) половина от величины второго критического тока.
- (Е) тот ток в однопоточном режиме, при котором электроны в середине промежутка тормозятся до нулевой скорости.
- (Ж) максимальный ток, который может быть пропущен через промежуток.
- (З) максимальный ток, который может быть пропущен через промежуток в однопоточном режиме.

37. В одномерной модели токопрохождения через плоский эквипотенциальный промежуток второй критический ток — это...

- (А) та величина тока инжекции, при которой происходит образование виртуального катода.
- (Б) та величина тока инжекции, при которой происходит исчезновение виртуального катода.
- (В) разность между инжектируемым током и проходящим током.
- (Г) разность между инжектируемым током и отраженным током.
- (Д) удвоенная величина первого критического тока.
- (Е) ток в однопоточном режиме, при котором электроны в середине промежутка тормозятся до нулевой скорости.
- (Ж) минимальный проходящий ток в режиме с виртуальным катодом.
- (З) максимальный проходящий ток в режиме с виртуальным катодом.
- (И) максимальный ток, который может быть пропущен через промежуток.
- (К) максимальный ток, который может быть пропущен через промежуток в однопоточном режиме.

38. Стационарный виртуальный катод в эквипотенциальном промежутке — это...

- (А) Воображаемый катод, находящийся внутри эквипотенциального промежутка.
- (Б) Поверхность внутри электронного пучка, на которой потенциал равен ускоряющему потенциалу пучка.
- (В) Поверхность внутри электронного пучка, на которой скорость электронов меняет знак.

(Г) Поверхность внутри электронного пучка, на которой напряженность электрического поля равна нулю.

39. В чем заключается явление гистерезиса при токопрохождении в плоском эквипотенциальном промежутке?

(А) Область гистерезиса находится по величине тока инжекции между первым и вторым критическими токами. При прохождении от левой границы области к правой (в сторону наращивания тока инжекции) токопрохождение в промежутке имеет однопоточный характер с осцилляциями, при этом величина проходящего тока совершает колебания от первого критического тока до второго критического тока. На правой границе области поток скачком переходит в стационарное двухпоточное состояние. При прохождении области гистерезиса от правой границы к левой в пучке сохраняется стационарное двухпоточное движение частиц с виртуальным катодом, которое на левой границе области плавно переходит в однопоточное.

(Б) Область гистерезиса соответствует интервалу по току инжекции от первого до второго критического тока. При прохождении от левой границы области к правой токопрохождение в промежутке имеет стационарный однопоточный характер. На правой границе области поток скачком переходит в двухпоточное состояние с виртуальным катодом. При прохождении области гистерезиса от правой границы к левой в пучке сохраняется двухпоточное движение частиц с виртуальным катодом, которое на левой границе области плавно переходит в однопоточное.

(В) Область гистерезиса занимает положение по величине тока инжекции между первым и вторым критическими токами. При прохождении от левой границы области к правой токопрохождение в промежутке имеет двухпоточный характер с осцилляциями виртуального катода, при этом величина проходящего тока колеблется от первого критического до второго критического. На правой границе области поток скачком переходит в стационарное двухпоточное состояние. При прохождении области гистерезиса от правой границы к левой в пучке сохраняется стационарное двухпоточное движение частиц с виртуальным катодом, на левой границе области гистерезиса плавно переходящее в однопоточное.

40. При неограниченном увеличении тока инжекции в плоский эквипотенциальный промежуток виртуальный катод...

(А) приближается к левой границе промежутка.

(Б) приближается к правой границе промежутка.

(В) стабилизируется вблизи середины промежутка.

(Г) в нерелятивистском случае смещается к левому электроду, а в ультрарелятивистском пределе стабилизируется вблизи середины промежутка.

41. При неограниченном увеличении тока инжекции в плоский эквипотенциальный промежуток величина проходящего тока стремится к ...

(А) нулю.

(Б) бесконечности.

(В) величине тока инжекции.

(Г) величине тока инжекции за вычетом первого критического тока.

(Д) первому критическому току.

(Е) одной четвертой от первого критического тока.

(Ж) одной второй от первого критического тока.

(З) второму критическому току.

(И) удвоенной величине второго критического тока.

(К) величине тока в плоском диоде с тем же зазором и приложенным напряжением, соответствующим энергии инжекции электронов.

42. Частота релаксационных колебаний при установлении тока в нерелятивистском плоском диоде определяется...

- (А) временем пролета электронов через промежутки.
 (Б) циклотронной частотой для электронов.
 (В) плазменной частотой для электронов (с точностью до коэффициента).
43. Частота релаксационных колебаний для потока отраженных электронов при большой надкритичности тока инжекции...
- (А) определяется временем пролета частиц до виртуального катода и обратно и не зависит от тока инжекции.
 (Б) пропорциональна величине проходящего тока.
 (В) обратно пропорциональна величине проходящего тока.
 (Г) пропорциональна току инжекции.
 (Д) пропорциональна корню квадратному из тока инжекции.
 (Е) пропорциональна квадрату тока инжекции.
 (Ж) обратно пропорциональна току инжекции.
 (З) обратно пропорциональна корню квадратному из тока инжекции.
 (И) обратно пропорциональна квадрату тока инжекции.
44. В потоке с виртуальным катодом разброс электронов по энергии инжекции...
- (А) Усиливает релаксационные колебания виртуального катода. При разбросе по энергии инжекции больше некоторого осцилляции переходят в режим автоколебаний.
 (Б) Подавляет релаксационные автоколебания. При разбросе по энергии инжекции больше некоторого токопрохождение приобретает квазистационарный характер.
 (В) Оказывает незначительное влияние на характер токопрохождения. Свойства виртуального катода как фазового сепаратора обеспечивают выравнивание электронов по кинетической энергии в проходящем и отраженном потоках.
45. Чем определяется предельный ток транспортировки замагниченного трубчатого электронного пучка в однородной круглой трубе дрейфа?
- (А) Соотношением радиусов трубы и пучка, длиной трубы.
 (Б) Диаметрами трубы и пучка. Слишком толстый пучок может не пройти в трубу.
 (В) Соотношением радиусов трубы и пучка, ускоряющим напряжением пучка.
 (Г) Соотношением радиусов трубы и пучка, ускоряющим напряжением пучка, длиной трубы.
46. Почему трубчатый электронный пучок с заданным током, направляемый сильным магнитным полем, может находиться в однородном канале транспортировки в двух состояниях, различающихся скоростью частиц и плотностью заряда?
- (А) Потому что электроны в пучке могут совершать движение как в положительном, так и в отрицательном направлении.
 (Б) Вследствие диамагнетизма электронного пучка. Положительному и отрицательному направлениям ведущего магнитного поля соответствуют два различных токовых состояния пучка.
 (В) Величина тока пучка есть произведение скорости частиц и погонной плотности заряда. Одно и то же произведение получается при двух различных соотношениях между сомножителями.
47. Указать правильное выражение для релятивистского фактора электронов, соответствующего предельному току транспортировки
- (А) Γ^3 (Б) 3Γ (В) $\Gamma+3$ (Г) $\Gamma-3$ (Д) $\Gamma^{1/3}$
 (Е) $\Gamma^{-1/3}$ (Ж) $\Gamma/3$ (З) $\Gamma^{2/3-1}$ (И) $\Gamma^{2/3}-1$ (К) $\Gamma^{1/3}-1$

48. При решении задачи о токе коаксиального диода с магнитной изоляцией достаточно воспользоваться сохранением следующих физических величин...
- (А) Суммы кинетической и потенциальной энергии электронов.
 - (Б) Механического импульса диода.
 - (В) Обобщенного импульса диода.
 - (Г) Осевой проекции момента обобщенного импульса.
 - (Д) Потенциальной энергии электронов, механического импульса.
 - (Е) Суммы кинетической и потенциальной энергии электронов, механического импульса.
 - (Ж) Суммы кинетической и потенциальной энергии электронов, обобщенного импульса.
 - (З) Суммы кинетической и потенциальной энергии электронов, осевой проекции момента обобщенного импульса.
49. Почему поток обобщенного импульса через кромку катода в рассмотренной нами модели КДМИ равен нулю?
- (А) Скорость электронов на кромке катода нулевая, поэтому корпускулярная составляющая потока импульса нулевая. Сила давления со стороны электрического поля уравновешивается силой реакции катододержателя (который считаем жестко закрепленным). Отсюда суммарная нулевая сила и нулевой поток импульса.
 - (Б) Скорость электронов на кромке катода нулевая. Электрическое поле на кромке возрастает при уменьшении ее толщины; тем не менее, давление электрического поля на кромку в пределе ее нулевой толщины стремится к нулю. Значит, в нуль обращается суммарная сила, действующая на кромку, и, следовательно, поток импульса через нее.
 - (В) Скорость электронов на кромке катода нулевая, как и напряженность электрического поля (поскольку кромка покрыта плазмой). Отсюда нулевое суммарное давление и нулевой поток импульса.
50. При заданных радиусах электронного пучка (катода КДМИ) и трубы дрейфа (анода КДМИ) ток Федосова...
- (А) превышает предельный ток транспортировки, однако в ультрарелятивистском пределе эти две величины совпадают.
 - (Б) меньше предельного тока транспортировки. В ультрарелятивистском пределе эти две величины имеют различные асимптотики.
 - (В) меньше предельного тока транспортировки, однако в ультрарелятивистском пределе эти две величины совпадают.
 - (Г) При величине ускоряющего напряжения ниже критического ток Федосова меньше предельного тока транспортировки, и наоборот. Ультрарелятивистские асимптотики двух этих токов расходятся.
51. Что такое магнитная изоляция?
- (А) Высоковольтная изоляция на основе ферромагнитных изолирующих материалов.
 - (Б) Устройство передающей линии, препятствующее «схлопыванию» проводников линии силой магнитного поля тока.
 - (В) Изоляция вакуумного промежутка с помощью магнитного поля, препятствующего пересечению промежутка заряженными частицами.
52. Что такое изолирующий ток?
- (А) Максимальная величина тока, который может быть пропущен через линию без нарушения ее изоляции.
 - (Б) Протекающий по вакуумной линии ток такой величины, что его магнитное поле достаточно для изоляции линии.
 - (В) Частное от деления изолирующего напряжения на изолирующее сопротивление.
53. Ток зарядки коаксиальной вакуумной линии...

- (А) в одноэлектронном приближении всегда меньше критического тока магнитной изоляции для этой линии.
 (Б) всегда превышает критический ток магнитной изоляции.
 (В) При величине волнового сопротивления линии ниже критического ток зарядки линии превышает ток магнитной изоляции, и наоборот.

54. Указать правильное выражение для скорости движения фронта магнитной самоизоляции:

(А) $v_f = c \sqrt{\frac{\Gamma + 1}{\Gamma - 1}}$ (Б) $v_f = c \sqrt{\frac{\Gamma - 1}{\Gamma + 1}}$

(В) $v_f = c \left(\frac{\Gamma - 1}{\Gamma + 1} \right)$ (Г) $v_f = c \left(\frac{\Gamma + 1}{\Gamma - 1} \right)$

55. Указать правильное выражение для критического тока изоляции линии в одноэлектронном приближении:

(А) $\frac{I_0}{2 \ln(R_a/R_k)} (\Gamma^{2/3} - 1)^{3/2}$ (Б) $\frac{I_0}{2 \ln(R_a/R_k)} \sqrt{\Gamma - 1}$

(В) $\frac{I_0}{2} \sqrt{\Gamma^2 - 1}$ (Г) $\frac{I_0}{2 \ln(R_a/R_k)} \sqrt{\Gamma^2 - 1}$

(Д) $\frac{I_0}{2 \ln(R_a/R_k)} \sqrt{\Gamma + 1}$ (Е) $I_c = \frac{mc^3}{e} \beta \gamma$

56. Указать правильное выражение для фазовой скорости медленной волны объемного заряда

(А) $v_\phi = \text{Re} \left[v_0 e^{i(\omega t - hz)} \right]$ (Б) $v_0 - \frac{\omega_e}{h}$ (В) $v_0 + \frac{\omega_e}{h\gamma}$

(Г) $v_0 - \frac{\omega_e}{h\gamma^{3/2}}$ (Д) v_0 (Е) c

57. Указать правильное выражение для групповой скорости быстрой волны объемного заряда

(А) $\frac{\partial \omega_e}{\partial h}$ (Б) $v_0 + \frac{\omega_e}{h}$ (В) v_0 (Г) c

58. Волны объемного заряда являются...

- (А) продольными.
 (Б) поперечными.
 (В) гибридными.
 (Г) акустическими.
 (Д) электромагнитными.
 (Е) разновидностью ударных волн.

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
проф. ООД, д.ф.-м.н.



И. В. Пегель

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 «Физика интенсивных пучков заряженных частиц» 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.