

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

**Физический факультет
Кафедра физики ускорителей**



Рабочая программа дисциплины

ЭЛЕКТРОННАЯ ОПТИКА И ФИЗИКА ПУЧКОВ

направление подготовки: **03.03.02 Физика**
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения
Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	72	32	32		2	2	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 66 часов										
Компетенции ПК-1										

Ответственный за образовательную программу,
д.ф.-м.н., проф.

С.В. Цыбуля

Новосибирск, 2022

Содержание

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

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

Дисциплина «Электронная оптика и физика пучков» представляет собой начальный курс, предназначенный для обучения студентов-физиков, специализирующихся в области физики ускорителей, которые для создания современных ускорительных комплексов будут в своей последующей работе использовать знание об устройстве и принципах работы электроннооптических систем.

Целью освоения курса является ознакомление студентов с принципами работы современных электроннооптических систем, с конструкцией их основных компонентов, а также основными физическими явлениями, влияющих на параметры пучков заряженных частиц.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p>ПК-1 Способность использовать специализированные знания в области физики при построении теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p>ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.</p> <p>ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области.</p> <p>ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p>Знать основные физические явления, влияющие на параметры пучков заряженных частиц, а также принципы работы и конструкции основных компонентов современных электроннооптических систем.</p> <p>Уметь проводить расчёты движения пучков заряженных частиц, а также расчёты полей элементов электронно-оптических систем, необходимые для разработки и конструирования ускорителей заряженных частиц.</p> <p>Владеть аналитическими методами расчёта и оптимизации полей и параметров пучков заряженных частиц в электроннооптических системах современных ускорительных установок.</p>

Всюду, где это допускается уровнем знаний и подготовки студентов, материал лекционного курса увязывается с современными исследованиями в области физики ускорителей. Поскольку институт стоит у истоков ускорительной техники, весь курс построен с учетом практических знаний, имеющихся у его коллектива. Кроме этого, студенты могут «вживую» ознакомиться со многими макетами различных ускорительных разработок, а также с действующими установками, созданными в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Материал лекционного курса также увязывается с задачами, рассматриваемыми на практических занятиях.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Электронная оптика и физика пучков» является дисциплиной вариативной части подготовки бакалавра по направлению «03.03.02 Физика» и реализуется в осеннем семестре 3-го курса кафедрой физики ускорителей. Для его восприятия требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим и математическим дисциплинам, как электродинамика, а также высшая алгебра, математический анализ, дифференциальные уравнения. Он должен предшествовать выполнению квалификационной работы бакалавра по данной специализации, т.к. дает бакалавру необходимые знания, навыки и предоставляет инструменты для выполнения исследовательской работы в области расчетов динамики частиц в ускорителях в рамках подготовки его квалификационной работы (Практика и научно-исследовательская работа в НИИ).

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

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	72	32	32		2	2	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 66 часов										
Компетенции ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, консультации, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: задания для самостоятельного решения;
- промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- практические занятия – 32 часа;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 2 часа;
- промежуточная аттестация (подготовка к промежуточной аттестации, консультации, экзамен) – 6 часов.

Объем контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, экзамен) составляет 66 часов).

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

Дисциплина «Электронная оптика и физика пучков» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 3-м курсе физического факультета НГУ в 5 семестре. Общая трудоёмкость дисциплины составляет 2 зачётные единицы, 72 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)					Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Консультации	
				Лекции	Практические занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Движение заряженных частиц в электромагнитном поле	1-4	14	8	6			
2	Элементы электронно-оптических систем	5-7	11	6	4	1		
3	Пучки малой интенсивности	8-10	11	6	4	1		
4	Интенсивные электронные пучки	11-13	10	6	4			
5.	Электронные пушки	14-16	10	6	4			
6.	Самостоятельная работа		2				2	
6.	Экзамен		4				2	2
Всего			72	32	32	2	4	2

Программа и основное содержание лекций (32 часа)

Раздел 1. Движение заряженных частиц в электромагнитном поле (8 часов)

Пучки частиц. Опорная частица. Координатный трехгранник Серре-Френе. Параксиальное приближение. Применение матриц для описания движения. Матрицы 6×6 и 2×2 . Матрицы пустого промежутка.

Раздел 2. Элементы электронно-оптических систем (6 часов)

Тонкие линзы. Типы линз: квадруполь, соленоиды, литиевые и др. Их фокусные расстояния. Движение частицы в магнитной квадрупольной линзе. Матрица толстой линзы. Дублеты и триплеты, их фокусные расстояния. Характеристические плоскости оптической системы. Движение в однородном магнитном поле (горизонтальная фокусировка поворотом). Магнит с показателем спада, его матрицы. Условие устойчивости поперечного движения в азимутально симметричном ускорителе. Краевая фокусировка. Секторный магнит и магнит с параллельными краями.

Частицы с отклоненной энергией: уравнения движения; поперечная дисперсия - элемент 6×6 матрицы преобразования. η -функция периодических систем. Ахроматические системы. Изменение длины траектории при поперечном отклонении частицы. Продольная дисперсия. Изохронные системы. Коэффициент уплотнения орбит. 6×6 матрица магнита с показателем спада.

Матрица ускоряющего зазора. "Изменение" фазового объема. Зазор с переменным напряжением. Клистронная группировка.

Связь поперечных степеней свободы. Косой квадруполь, поворот медианной плоскости и соленоид.

Раздел 3. Пучки малой интенсивности (6 часов)

Преобразование фазовой плоскости в пустом промежутке, тонкой и толстой линзах. Описание пучка при помощи эллипса на фазовой плоскости. Параметры эллипса. β -функция и огибающая. Преобразование огибающей при прохождении системы с известной лучевой матрицей. Уравнение Хилла. Уравнение огибающей. Эмиттанс и акцептанс. Периодические системы: согласованный фазовый эллипс, акцептанс, огибающая. Распределение частиц в фазовом пространстве: ступенчатое, гауссово и Капчинского-Владимирского. Волновые гауссовы пучки.

Рост эмиттанса при прохождении через вещество. Эффективный рост эмиттанса из-за неидеальностей магнитной системы. Нормализованный эмиттанс. Яркость катода с сеткой. Эмиттанс "замагниченного" катода. Интегральные инварианты 6-мерного фазового пространства. Измерение эмиттанса. Измерение энергетического разброса и длины сгустка.

Аберрации. Разложение магнитного поля около равновесной траектории. Секступольные и октупольные линзы. Компенсация хроматической аберрации секступолями. Рост эмиттанса из-за наличия аберраций.

Раздел 4. Интенсивные электронные пучки (6 часов)

Гидродинамическое приближение. Поперечные силы в круглом и плоском пучках. Изменение поперечных размеров ламинарного пучка в пустом пространстве. Сравнение влияния сил пространственного заряда и эмиттанса на размеры; критерии применимости гидродинамического приближения и пренебрежения силами пространственного заряда. "Провисание потенциала", энергетический разброс и предельный ток. Продольное расталкивание (случай длинного сгустка и коротковолновой модуляции плотности). Эффективное приращение эмиттанса из-за поперечного расталкивания. Компенсация пространственного заряда пучка ионами остаточного газа. Пучок в продольном магнитном поле. Бриллюэновский поток, максимальная равновесная плотность тока.

Раздел 5. Электронные пушки (6 часов)

Закон "трех вторых". Первеанс. Пушки Пирса. Анодная линза. Виртуальный катод. Пушки с малыми шумами тока. Электронная эмиссия и типы катодов.

Самостоятельная работа студентов (4 часа)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Решение задач для самостоятельного решения	2
Подготовка к экзамену	2

5. Перечень учебной литературы.

1. И.Н. Мешков. Введение в физику пучков заряженных частиц. Пучки низкой интенсивности. Новосибирск, НГУ, 1988. (4 экз.)

2. Н. А. Винокуров. Лекции по электронной оптике для ускорительных физиков. Электронное пособие, <http://accel.inp.nsk.su/library/Elopt24.pdf>.

3. N. A. Vinokurov. Space Charge. В сб.: High Quality Beams. US-CERN-Japan-Russia Accelerator School. AIP Conf. Proc. V. 592, Melville, New York, 2001, pp.390 – 404, <http://accel.inp.nsk.su/library/Spchrge.pdf>.

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

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

1. А.А. Коломенский и А.Н.Лебедев. Теория циклических ускорителей. М.: Физматгиз, 1962.
2. Г.С. Ландсберг. Оптика. М.: Физматлит, 2003.
3. С.И. Молоковский и А.Д. Сушков. Интенсивные электронные и ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1991.

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

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

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

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используется.

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

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

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

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

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

Для реализации дисциплины «Электронная оптика и физика пучков» используются специальные помещения:

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

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

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

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

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

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

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем обсуждения решения домашних заданий, а также сдачи решений обязательных заданий.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания из области электронной оптики и физики пучков в профессиональной деятельности.

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

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

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.	Знать основные физические явления, влияющие на параметры пучков заряженных частиц, а также принципы работы и конструкции основных компонентов современных электроннооптических систем.	Проведение контрольных работ, экзамен.
ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных исследований в избранной области	Уметь проводить расчёты движения пучков заряженных частиц, а также расчёты полей элементов электроннооптических систем, необходимые для разработки и конструирования ускорителей заряженных частиц.	Проведение контрольных работ, экзамен.

<p>ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p>Владеть аналитическими методами расчёта и оптимизации полей и параметров пучков заряженных частиц в электроннооптических системах современных ускорительных установок.</p>	<p>Проведение контрольных работ, экзаменов.</p>
--	--	---

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Электронная оптика и физика пучков».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

10.3 Типовые задания для самостоятельной работы, необходимые для оценки результатов обучения

ЗАДАНИЕ № 1

1. Найти матрицы дублета квадрупольей. Длина каждой линзы - 60 см, градиент - 2кГс/см, энергия электронов - 2 ГэВ. Определить из матриц фокусные расстояния и положения главных плоскостей. Какой ток в обмотках вокруг полюсов квадрупольей соответствует данному градиенту, если диаметр вписанного в апертуру квадруполья круга равен 8 см?
2. Записать 6x6 матрицу магнита с однородным магнитным полем и одним краем (т.н. магнитное зеркало, см. рис.). Указание: обязательно учесть краевую фокусировку.
3. Записать 4x4 матрицу длинного соленоида с короткими краями в виде произведения матриц краев и промежутка с однородным полем.
4. Ахроматический поворот состоит из двух магнитов с параллельными краями (радиус поворота $R=50$ см, угол поворота $\vartheta=30^\circ$) и тонкой квадрупольной линзы между ними. Расстояния от линзы до краев магнитов $L=50$ см. Опорная траектория входит в первый магнит и выходит из второго нормально к краю магнита. Записать 6x6 матрицу такой системы. Чему равно максимальное допустимое отклонение частиц по импульсу, если горизонтальная апертура в линзе - $\pm a$, где $a=5$ см.
5. Задачи 1 и 2 к главе 3 учебника И.Н.Мешкова "Введение...". Какое искажение опорной траектории получается при поперечном смещении одной из линз? Найти смещение, при котором акцептанс уменьшается в два раза. Подставить в формулы $L=100$ см и радиус вписанного круга $a=1$ см.

ЗАДАНИЕ № 2

1. Вывести формулу для изменения параметров фазового эллипса пучка с гауссовым распределением, прошедшего через тонкий рассеиватель (фольгу), характеризующийся дисперсией $\langle \Delta^2 \rangle$.
2. Найти акцептанс круглой трубы длиной L и радиусом R . При решении использовать распределение Капчинского-Владимирского.
3. Один из способов измерения эмиттанса состоит в следующем. После линзы с известным фокусным расстоянием на некотором расстоянии от нее ставится измеритель поперечного размера пучка и снимается зависимость размера от оптической силы. Найти эту зависимость. Как по ней определить эмиттанс?
4. Найти условие устойчивости лучей в открытом оптическом резонаторе, состоящем из двух зеркал с радиусом кривизны R_1 и R_2 . Расстояние между зеркалами d . (Указание: заменить резонатор последовательностью линз.) По формуле $a=(\lambda\beta/\pi)^{1/2}$ определить расстояние от оптической оси, на котором поле основной (TEM₀₀) моды спадает в 2.7 раза на зеркалах и в перетяжке (для простоты взять $R_1=R_2$). Подставить $\lambda=0.63$ мкм, $R_1=R_2=d=1$ м.
5. Пучок с эмиттансом ϵ проходит через поворотный магнит с горизонтальной апертурой a . Оценить максимальное разрешение по импульсу $\delta p/p$? Угол поворота магнита можно считать малым.

Вопросы на экзамену:

1. Пучки частиц. Опорная частица. Координатный трехгранник Серре-Френе.
2. Преобразование фазовой плоскости в пустом промежутке, тонкой и толстой линзах. Описание пучка при помощи эллипса на фазовой плоскости. Параметры эллипса. β -функция и огибающая.
3. Параксиальное приближение. Применение матриц для описания движения. Матрицы 6x6 и 2x2. Матрицы пустого промежутка.
4. Преобразование огибающей при прохождении системы с известной лучевой матрицей.

5. Тонкие линзы. Типы линз: квадруполь, соленоиды, литиевые и др. Их фокусные расстояния.
6. Уравнение Хилла. Уравнение огибающей.
7. Движение частицы в магнитной квадрупольной линзе. Матрица толстой линзы. Дублеты и триплеты, их фокусные расстояния.
8. Эмиттанс и акцептанс. Периодические системы: согласованный фазовый эллипс, акцептанс, огибающая.
9. Характеристические плоскости оптической системы.
10. Распределение частиц в фазовом пространстве: ступенчатое, гауссово и Капчинского-Владимирского.
11. Движение в однородном магнитном поле (горизонтальная фокусировка поворотом). Магнит с показателем спада, его матрицы.
12. Рост эмиттанса при прохождении через вещество. Эффективный рост эмиттанса из-за неидеальностей магнитной системы.
13. Краевая фокусировка. Секторный магнит и магнит с параллельными краями.
14. Нормализованный эмиттанс. Яркость катода с сеткой. Эмиттанс "замагниченного" катода.
15. Частицы с отклоненной энергией: уравнения движения; поперечная дисперсия - элемент бхб матрицы преобразования. η -функция периодических систем. Ахроматические системы.
16. Измерение эмиттанса. Измерение энергетического разброса и длины сгустка.
17. Изменение длины траектории при поперечном отклонении частицы. Продольная дисперсия. Изохронные системы. Коэффициент уплотнения орбит.
18. Гидродинамическое приближение. Поперечные силы в круглом и плоском пучках. Изменение поперечных размеров ламинарного пучка в пустом пространстве.
19. бхб матрица магнита с показателем спада.
20. Сравнение влияния сил пространственного заряда и эмиттанса на размеры; критерии применимости гидродинамического приближения и пренебрежения силами пространственного заряда.
21. Матрица ускоряющего зазора. "Изменение" фазового объема. Зазор с переменным напряжением. Клистронная группировка.
22. Пучок в продольном магнитном поле. Бриллюэновский поток, максимальная равновесная плотность тока.
23. Связь поперечных степеней свободы. Косой квадруполь, поворот медианной плоскости и соленоид.
24. Пушки Пирса.

Задачи к экзамену:

1. Записать лучевую матрицу перехода через границу сред с различными показателями преломления. Сравнить её с матрицей тонкого ускоряющего зазора. Объяснить причину схождения.
2. Записать 4×4 матрицу тонкого элемента. Наложить на неё условие симплектичности и найти ненулевые независимые матричные элементы. Объяснить их смысл.
3. Записать условие устойчивости трёхзеркального оптического резонатора с одинаковыми сферическими зеркалами, расположенными в вершинах равностороннего треугольника.
4. Найти лучевую матрицу телескопа Кеплера, состоящего из двух фокусирующих линз. Найти расстояние между линзами и угловое увеличение.
5. Найти условие устойчивости и структурные функции (обе β и поперечную дисперсию) азимутально симметричного циклического ускорителя с заданным показателем спада магнитного поля.
6. С какой частотой изменяется поперечный размер инжектированного в накопитель несогласованного пучка?

7. Найти расстояние между главными плоскостями симметричного дублета. Квадрупольные линзы считать тонкими.

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

**Лист актуализации рабочей программы
по дисциплине «Электронная оптика и физика пучков»
по направлению подготовки 03.03.02 Физика
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

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