

**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**

**ЛАЗЕРЫ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ**

направление подготовки: **03.04.02 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
3	36	16			18				2	
Всего 36 часа / 1 зачётная единица, из них: - контактная работа 18 часов										
Компетенции ПК-1										

Руководитель программы  
д.ф.-м.н.

И. Б. Логашенко

Новосибирск, 2022

Содержание.....	2
1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. ....	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы. ....	3
3. Трудоёмкость 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. ....	4
5. Перечень учебной литературы. ....	6
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.....	6
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. ....	7

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

Дисциплина «Лазеры на свободных электронах» имеет своей целью дать профессионально подготовленным физикам информацию о принципах действия и устройстве лазеров на свободных электронах, а также технологиях, применяемых при их создании. Она предназначена для обучения специалистов, которые будут в своей последующей работе использовать знание об устройстве и принципе работы новых технологически сложных компонентов современных источников электромагнитного излучения на основе релятивистских электронных пучков.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p><b>ПК-1</b> Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p><b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> <p><b>ПК 1.2</b> Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p><b>Знать</b> принципы работы лазеров на свободных электронах, их основные подсистемы и узлы, а также примеры реализации этих принципов и элементов конструкции ЛСЭ в современных установках; способы использования понятий, моделей, законов и теорий общей и теоретической физики для оценок параметров ЛСЭ и их оптимизации;</p> <p><b>Уметь</b> самостоятельно формулировать требования и проектировать основные узлы ЛСЭ; применять полученную теоретическую базу для проектирования подсистем ЛСЭ и анализа возможности создания установок на базе различных типов электронных ускорителей, проводить анализ научной и технической информации в области физики и техники ЛСЭ;</p> <p><b>Владеть</b> аналитическими и численными методами расчёта параметров излучения ЛСЭ и их основных элементов; знаниями на уровне, позволяющем проводить эффективный анализ научной и технической информации в области создания и использования ЛСЭ.</p>

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Лазеры на свободных электронах» реализуется в осеннем семестре 2-го курса для магистрантов, обучающихся по направлению 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой ускорителей. Для его восприятия требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим дисциплинам как электродинамика, электронная оптика и физика пучков, механика и теория относительности, а также

по математике (основы математического анализа, линейная алгебра и геометрия). Дисциплина должна предшествовать выполнению выпускной квалификационной работы т.к. дает магистранту необходимые знания, навыки и предоставляет инструменты для выполнения исследований в области физики ускорителей в рамках ее подготовки.

**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
3	36	16			18				2	
Всего 36 часов / 1 зачётная единица, из них: - контактная работа 18 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, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью опросов, дифференцированный зачет.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: опрос по материалам предыдущей лекции;
- промежуточная аттестация: дифференцированный зачет.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 1 зачетную единицу.

- занятия лекционного типа – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов;
- промежуточная аттестация (дифференцированный зачет) – 2 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, дифференцированный зачет) составляет 18 часов.

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

Дисциплина «Лазеры на свободных электронах» представляет собой полугодовой курс, читаемый в осеннем семестре 2-го курса магистратуры физического факультета НГУ. Общая трудоемкость дисциплины составляет 1 зачетную единицу, 36 академических часов.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студен- тов и трудоёмкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Излучение релятивистских частиц	1-4	7	4		3	
2	Процессы спонтанного и вынужденного излучения	5-6	5	2		3	
3	Продольная группировка электронов по- лем синхронной волны	7-10	7	4		3	
4	ЛСЭ-генератор	11-12	5	2		3	
5.	Ограничения на параметры электронного пучка	13-14	5	2		3	
6.	Ускорители для ЛСЭ	15-16	5	2		3	
7.	Дифференцированный зачет	17	2				2
<b>Всего</b>			<b>36</b>	<b>16</b>		<b>18</b>	<b>2</b>

### Программа и основное содержание лекций (16 часов)

#### Раздел 1. Излучение релятивистских частиц (4 часа)

Движение заряженных частиц в электромагнитном поле. Синхротронное излучение. Рассеяние волн. Ондуляторное излучение. Параметр ондуляторности  $K$ . Ондуляторы: движение электронов, излучение и конструкции магнитных систем. (Движение электрона в периодическом поперечном магнитном поле. Конструкции ондуляторов: электромагниты и постоянные магниты. Расчёт магнитного поля. Фокусировка электронов в ондуляторе. Ондуляторы на бегущей волне.

#### Раздел 2. Процессы спонтанного и вынужденного излучения (2 часа)

Общая постановка задачи. Ансамбли излучателей. Когерентное и некогерентное излучение. Вынужденное излучение как результат синхронизации излучателя с внешней волной

#### Раздел 3. Продольная группировка электронов полем синхронной волны (4 часа)

Движение электрона в ондуляторе в присутствии попутной волны. Условие синхронизма. Итеративное решение уравнений продольного движения. Усреднение по начальным условиям и теорема Мэйди. Оптический клистрон. Условие синхронизма в лампах бегущей волны. Вынужденное ондуляторное излучение. Нахождение величины усиления слабого сигнала. Гауссовы световые пучки. Усиление для случая гауссова пучка. Оптимальная длина Рэлея.

#### Раздел 4. ЛСЭ-генератор (2 часа)

Создание обратной связи при помощи зеркал. Открытые оптические резонаторы. Лучевая матрица и условие устойчивости оптического резонатора. Условие генерации. Периодические электронные сгустки и режим синхронизации продольных мод оптического резонатора. ЛСЭ с большим усилением. Радиационная неустойчивость электронного пучка в ондуляторе. Оценка длины нарастания.

## **Раздел 5. Ограничения на параметры электронного пучка (2 часа)**

Влияние конечных поперечных эмиттансов и энергетического разброса на усиление электромагнитной волны. Оптимизация параметров электронного пучка. Максимальная мощность излучения ЛСЭ. Предельная группировка. Нарушение условия синхронизма и максимальный электронный к. п. д. Оптимальная прозрачность выходного зеркала ЛСЭ-генератора.

## **Раздел 6. Ускорители для ЛСЭ (2 часа)**

Линейные ускорители и микротрон. Электронные накопители: ограничение мощности. Ускорители-рекуператоры. Некоторые примеры ЛСЭ и их использования. Новосибирский ЛСЭ терагерцового диапазона. Рентгеновский ЛСЭ LCLS.

### **Самостоятельная работа студентов (18 часа)**

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Изучение материала лекций	16
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	2

#### **5. Перечень учебной литературы.**

1. С.И. Молоковский, А.Д. Сушков. Интенсивные электронные и ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1991. ISBN 5-283-03973-0. (3 экз.)
2. Г.С. Ландсберг. Оптика: учебное пособие для студентов физических специальностей высших учебных заведений. 5-е изд., перераб. и доп. Москва: Наука, 1976 (157)

#### **6. Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:**

1. А.А. Коломенский, А.Н.Лебедев. Теория циклических ускорителей. М.: Физматгиз, 1962.
2. Н. А. Винокуров. Лазеры на свободных электронах. Электронное пособие, [http://accel.inp.nsk.su/library/FEL\\_lectons.pdf](http://accel.inp.nsk.su/library/FEL_lectons.pdf).
3. Н. А. Винокуров, О. А. Шевченко. Лазеры на свободных электронах и их разработка в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН. Успехи физических наук, том 188 № 5, с. 493 – 507, 2018
4. Н. А. Винокуров, Е. Б. Левичев. Ондюляторы и вигглеры для генерации излучения и других применений. Успехи физических наук, том 185 № 9, с. 917 – 939, 2015

#### **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 используются.

##### **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 «Лазеры на свободных электронах» 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 успеваемости***

Текущий контроль успеваемости осуществляется в ходе семестра путем опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции.

#### ***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 в области физики

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит во время дифференцированного зачета. Зачет проводится в конце семестра в зачетную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции 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. Критерии и шкалы оценивания индикаторов достижения результатов обучения отражены в Таблице 10.2.

### Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
<b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	<b>Знать</b> основные уравнения движения сплошной среды и основные методы применения теории функций комплексного переменного в плоских задачах газовой динамики; иметь представления об особенностях процессов обтекания тел, в зависимости от модели жидкости (вязкость, сжимаемость).	Опрос в начале каждой лекции, дифференцированный зачет.
<b>ПК 1.2</b> Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	<b>Уметь</b> пользоваться законами газовой динамики для решения простейших задач, выводить систему уравнений, описывающую движение сплошной среды, пользуясь интегральными законами сохранения, применять к ней приближения, в частности, приближение газовой динамики. <b>Владеть</b> методами решения задач о простых и ударных волнах, их основных свойствах, распаде произвольного разрыва, а также асимптотическими методами в теоретических задачах газовой динамики.	Опрос в начале каждой лекции, дифференцированный зачет.

### 10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Лазеры на свободных электронах».

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	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные



			негрубых ошибок.	ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	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 1.2	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 контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

#### Вопросы к дифференцированному зачету

1. Излучение релятивистских частиц. (Движение заряженных частиц в электромагнитном поле. Синхротронное излучение. Рассеяние волн. Ондюляторное излучение. Параметр ондуляторности  $K$ .)
2. Ограничения на параметры электронного пучка. (Влияние конечных поперечных эмиттансов и энергетического разброса на усиление электромагнитной волны. Оптимизация параметров электронного пучка.)
3. Ондюляторы: движение электронов, излучение и конструкции магнитных систем. (Движение электрона в периодическом поперечном магнитном поле. Конструкции ондуляторов: электромагниты и постоянные магниты. Расчёт магнитного поля. Фокусировка электронов в ондуляторе. Ондюляторы на бегущей волне.)
4. Максимальная мощность излучения ЛСЭ. (Предельная группировка. Нарушение условия синхронизма и максимальный электронный к. п. д. Оптимальная прозрачность выходного зеркала ЛСЭ-генератора.)
5. Процессы спонтанного и вынужденного излучения. (Общая постановка задачи. Ансамбли излучателей. Когерентное и некогерентное излучение. Вынужденное излучение как результат синхронизации излучателя с внешней волной.)
6. Ускорители для ЛСЭ. (Линейные ускорители и микротрон. Электронные накопители: ограничение мощности. Ускорители-рекуператоры.)
7. Продольная группировка электронов полем синхронной волны. (Движение электрона в ондуляторе в присутствии попутной волны. Условие синхронизма. Итеративное решение уравнений продольного движения. Усреднение по начальным условиям и теорема Мэйди. Оптический клистрон. Условие синхронизма в лампах бегущей волны.)
8. Некоторые примеры ЛСЭ и их использования. (Новосибирский ЛСЭ терагерцового диапазона. Рентгеновский ЛСЭ LCLS.)
9. Вынужденное ондуляторное излучение. (Нахождение величины усиления слабого сигнала. Гауссовы световые пучки. Усиление для случая гауссова пучка. Оптимальная длина Рэлея.)

10. ЛСЭ-генератор. (Создание обратной связи при помощи зеркал. Открытые оптические резонаторы. Лучевая матрица и условие устойчивости оптического резонатора. Условие генерации. Периодические электронные сгустки и режим синхронизации продольных мод оптического резонатора.)

### **Вопросы к опросам для контроля усвоения материала курса**

1. Почему в ЛСЭ и других устройствах для генерации электромагнитного излучения используются электроны, а не протоны?
2. Чем магнитный ондулятор лучше электростатического?
3. Оценить количество магнитного материала, необходимого для изготовления одного метра ондулятора.
4. Какая мощность требуется для создания ондулятора на бегущей волне (длина волны – 1 мм, амплитуда поля – 1Т)?
5. Найти ток электронного пучка, необходимый для получения усиления 20% на длине волны 100 микрон при длине ондулятора 6 м.
6. Записать условие устойчивости трёхзеркального оптического резонатора с одинаковыми сферическими зеркалами, расположенными в вершинах равностороннего треугольника.
7. Нормализованный эмиттанс электронного пучка равен 0,1 микрона. Какова минимальная энергия частиц, необходимая для создания рентгеновского ЛСЭ с длиной волны излучения 0,1 нм?
8. Какой ток электронного пучка требуется для создания ЛСЭ с мощностью 1 МВт и длиной волны 1 микрон? Принять электронный к. п. д. ЛСЭ равным 1 %.

### **Пример билета к дифференцированному зачету**

1. Излучение релятивистских частиц. Движение заряженных частиц в электромагнитном поле. Синхротронное излучение. Рассеяние волн. Ондуляторное излучение. Параметр ондуляторности  $K$ .
2. Ограничения на параметры электронного пучка. Влияние конечных поперечных эмиттансов и энергетического разброса на усиление электромагнитной волны. Оптимизация параметров электронного пучка.

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 «Лазеры на свободных электронах»  
по направлению подготовки 03.04.02 Физика  
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

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