

**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 квантовой оптики**



**Рабочая программа дисциплины
НЕЛИНЕЙНАЯ ФОТОНИКА 2**

Направление подготовки: **03.04.02 Физика**

Направленность (профиль): **Физика. 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 итоговой аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем		
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет
2	72	32			18	18	2		2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов									
Компетенции ПК-1									

Руководитель программы
д.ф.-м.н.

И.Б. Логащенко

Новосибирск, 2026

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. 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
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	6
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 итоговой аттестации по дисциплине.	8

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

Дисциплина (курс) «**Нелинейная фотоника 2**» имеет своей непосредственной целью дать обучающимся знания об основах генерации методами нелинейной оптики лазерного излучения высокой и сверхвысокой мощности от фемтосекундной до аттосекундной длительности, в различных спектральных диапазонах включая терагерцовый, рентгеновский и гамма диапазоны. Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 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.	ПК 1.1 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. ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать основные методы решения задач в области нелинейной оптики в сильных э/м полях; основные физические механизмы нелинейно-оптического преобразования в сильных э/м полях; основные принципы формирования источников когерентного излучения в различных спектральных диапазонах, различной длительности и пиковой мощности при нелинейно-оптических взаимодействиях мощного лазерного излучения с материальными средами. Уметь выводить основные уравнения нелинейной оптики в сверхсильных полях, на основе уравнения Шредингера; оценивать основные факторы, определяющие процессы нелинейно-оптического преобразования интенсивного когерентного излучения в различных материальных средах; оптимизировать параметры нелинейно-оптического преобразования мощного лазерного излучения в материальных средах для генерации высокоинтенсивных импульсов различной длительности от фемтосекундной до аттосекундной длительности в разных спектральных диапазонах, включая терагерцовый, рентгеновский и гамма диапазон; Владеть ключевыми понятиями нелинейной фотоники, включая понятия явлений, описываемых нелинейным уравнением Шредингера; навыками работы с оптическими справочниками и каталогами оптических материалов.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Нелинейная фотоника 2» реализуется в весеннем семестре 1-го курса для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой квантовой оптики, второй частью годового цикла. Изложение материала опирается на знание студентами основ электродинамики, физики сплошных сред; обеспечена логическая связь «Нелинейной фотоники 1» с курсами «Физическая оптика» и «Волоконная оптика».

Курс, в первую очередь, предназначен для магистрантов, область будущей профессиональной деятельности которых включает:

- научные исследования, метрологию и инженерную деятельность с использованием лазерного излучения и квантово-оптических методов;
- исследования процессов взаимодействия оптического излучения с веществом;
- научные и технологические разработки в области мощных лазерных систем и генерации когерентного излучения в различных спектральных диапазонах - от терагерцового до гаммы.

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.

Трудоёмкость дисциплины составляет: 2 зачётные единицы, 72 часа.

Форма промежуточной аттестации: 1 семестр – экзамен.

№		Вид деятельности	Семестр
			1
1		Лекции, ч	32
2		Практические занятия, ч	-
3		Лабораторные занятия, ч	-
4		Занятия в контактной форме, ч из них	36
5		аудиторных занятий, ч	32
6		в электронной форме, ч	-
7		консультаций, час.	2
8		промежуточная аттестация, ч	2
9		Самостоятельная работа, час.	36
10		Всего, ч	72

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

Программа и основное содержание лекций (32 часа)

Раздел 1. Генерация импульсного излучения в лазерных резонаторах и измерение его параметров (8 часов)

Принцип синхронизации мод в лазерном резонаторе. Генерация частично когерентного импульсного излучения.

Типы ультракоротких импульсов (солитоны, диссипативные солитоны, симиляритоны).

Обзор источников ультракоротких импульсов (титан – сапфировый лазер, лазеры на SESAM, волоконные лазеры (NPE, NALM), дисковые лазеры)).

Экспериментальные методы измерения параметров импульсного излучения (автокорреляционные измерения, частотно-разрешенное оптическое стробирование (FROG), спектрально фазовая интерферометрия для восстановления электрического поля (SPIDER), измерение радиочастотного спектра импульсного излучения).

Раздел 2. Методы генерации фемтосекундных импульсов сверхвысокой мощности и интенсивности (8 часов)

Параметрическое усиление чирпованных импульсов в различных спектральных диапазонах

Когерентное сложение фс импульсов

Проблемы контраста и фокусируемости

Предельно достижимые интенсивности (швингеровский предел)

Раздел 3. Филаментация лазерного излучения в газовых и твердотельных средах (4 часа)

Механизмы филаментации

Генерация суперконтинуума при филаментации

Генерация импульсов минимальной длительности (малопериодных импульсов) при самосжатии

Распространение мощного фс излучения в полых волноводах (абляция стенок и другие эффекты)

Генерация терагерцового излучения в двухволновых схемах (другие методы генерации)

Раздел 4. Методы генерации когерентного рентгеновского и гамма излучений ультракороткой длительности (4 часа)

Генерация гармоник высокого порядка

Комптоновское рассеяние

Другие методы

Методы генерации аттосекундных и зептосекундных импульсов

Раздел 5. Методы генерации когерентного излучения аттосекундной длительности (4 часа)

Генерация аттосекундных импульсов в газовой струе одноимпульсным и многоимпульсным возбуждением

Генерация аттосекундных импульсов при взаимодействии мощного фемтосекундного излучения с твердотельными средами

Методы измерения параметров аттосекундных импульсов

Раздел 6. Генерация терагерцового излучения ультракороткой длительности и высокой интенсивности (2 часа)

Разностная частота в нелинейных кристаллах

В лазерной плазме

Другие методы (полупроводниковые структуры и т.п.)

Раздел 7. Нелинейные эффекты в телекоммуникациях (2 часа)

Взаимное нелинейное влияние информационных каналов; компенсирование нелинейных искажений,

Нелинейные способы кодирования и передачи информации;

ВКР технологии оптического усиления

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
-------------------------	------------

Подготовка к занятиям, изучение лекций	18
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. Шуберт М., Вильгельми Б. Введение в нелинейную оптику. – М.: Мир, 1973-1979, Ч.1: Классическое рассмотрение, 1973, 244 с. : ил. (20 экз), Ч.2: Квантовофизическое рассмотрение, 1979, 512 с. : ил. (11 экз.)

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

1. R. Boyd, Nonlinear optics, Academic Press, London, 2002.
2. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. М.: Наука, 1989.
3. Бломберген Н. Нелинейная оптика. М.: Мир, 1966.
4. G. Agrawal, Nonlinear fiber optics and photonics, Academic Press, London, 2007.
5. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная нелинейная оптика: Генераторы второй гармоники и параметрические генераторы света. М.: Радио и связь, 1982.
6. Дмитриев В.Г. Нелинейная оптика и обращение волнового фронта. М.: Физматлит, 2003.
7. Ахманов С.А., Хохлов Р.В. Проблемы нелинейной оптики. М.: ВИНТИ 1964.
8. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988.
9. Делоне Н.Б., Крайнов В.П. Основы нелинейной оптики атомарных газов. – М.: Наука, 1986.
10. Делоне Н.Б. Нелинейная оптика. М.: Физматлит, 2003.
11. Andrew D. Ludlow et al. Optical atomic clocks. Rev.Mod.Phys. 87, 2015, 637-701.
12. А.М. Желтиков «Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами» УФН, т.176, №6, стр.623 2006
13. Bulanov, S. S., Mur, V. D., Narozhny, N. B., Nees, J., & Popov, V. S. (2010). Multiple colliding electromagnetic pulses: a way to lower the threshold of $e^+ e^-$ pair production from vacuum. *Physical review letters*, 104(22), 220404.
14. Bulanov, S. S., Esirkepov, T. Z., Thomas, A. G., Koga, J. K., & Bulanov, S. V. (2010). Schwinger limit attainability with extreme power lasers. *Physical review letters*, 105(22), 220407.
15. Gelfer, E. G., Mironov, A. A., Fedotov, A. M., Bashmakov, V. F., Nerush, E. N., Kostyukov, I. Y., & Narozhny, N. B. (2015). Optimized multibeam configuration for observation of QED cascades. *Physical Review A*, 92(2), 022113.
16. Fedotov, A. M., Narozhny, N. B., Mourou, G., & Korn, G. (2010). Limitations on the attainable intensity of high power lasers. *Physical review letters*, 105(8), 080402.
17. С.В. Буланов, Т.Ж. Есиркепов, М. Кандо А.С. Пирожков, Н.Н. Розанов
Релятивистские зеркала в плазме — новые результаты и перспективы УФН 183 449–486 (2013)
18. Gubin, K. V., Lotov, K. V., Trunov, V. I., & Pestryakov, E. V. (2016). Modification of narrow ablating capillaries under the influence of multiple femtosecond laser pulses. *Journal of Applied Physics*, 120(11), 113103.
19. В. Г. Беспалов, С. А. Козлов, В. Н. Крылов, С. Э. Путилин «фемтосекундная оптика и фемтотехнологии» Учебное пособие ИТМО, Санкт-Петербург 2010
20. М.Ю.Емелин, М.Ю.Рябикин Основы аттосекундной физики, Учебное пособие Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского Нижний Новгород, 2014

21. Ipp, A., Keitel, C. H., & Evers, J. (2009). Yoctosecond photon pulses from quark-gluon plasmas. *Physical review letters*, 103(15), 152301.
22. Mourou, G. A., Fisch, N. J., Malkin, V. M., Toroker, Z., Khazanov, E. A., Sergeev, A. M., & Le Garrec, B. (2012). Exawatt-Zettawatt pulse generation and applications. *Optics Communications*, 285(5), 720-724.
23. Lan, P., Lu, P., Cao, W., & Wang, X. (2005). Attosecond and zeptosecond x-ray pulses via nonlinear Thomson backscattering. *Physical Review E*, 72(6), 066501.
24. Ciappina, M. F., Pérez-Hernández, J. A., Landsman, A. S., Okell, W. A., Zherebtsov, S., Förg, B., ... & Zimmermann, T. (2017). Attosecond physics at the nanoscale. *Reports on Progress in Physics*, 80(5), 054401.
25. Phuoc, K. T., Corde, S., Thaury, C., Malka, V., Tafzi, A., Goddet, J. P., & Rousse, A. (2012). All-optical Compton gamma-ray source. *Nature Photonics*, 6(5), 308.
26. Царев М.В. Генерация и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами : Учебное пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011. – 75 с.
27. Oh, T. I., Yoo, Y. J., You, Y. S., & Kim, K. Y. (2014). Generation of strong terahertz fields exceeding 8 MV/cm at 1 kHz and real-time beam profiling. *Applied Physics Letters*, 105(4), 041103.

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 «Нелинейная фотоника 2» используются специальные помещения:

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

10.1 Порядок проведения текущего контроля и итоговой аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль успеваемости студента проводится 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 свободно владеть знаниями в области нелинейной фотоники и использовать их 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 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 итоговой 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 решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать основные методы решения задач в области нелинейной оптики в сильных э/м полях; основные физические механизмы нелинейно-оптического преобразования в сильных э/м полях; основные принципы формирования источников когерентного излучения в различных спектральных диапазонах, различной длительности и пиковой мощности при нелинейно-оптических взаимодействиях мощного лазерного излучения с материальными средами.	Опрос в начале каждой лекции, дифференцированный зачет.

ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Уметь выводить основные уравнения нелинейной оптики в сверхсильных полях, на основе уравнения Шредингера; оценивать основные факторы, определяющие процессы нелинейно-оптического преобразования интенсивного когерентного излучения в различных материальных средах; оптимизировать параметры нелинейно-оптического преобразования мощного лазерного излучения в материальных средах для генерации высокоинтенсивных импульсов различной длительности от фемтосекундной до аттосекундной длительности в разных спектральных диапазонах, включая терагерцовый, рентгеновский и гамма диапазон; Владеть ключевыми понятиями нелинейной фотоники, включая понятия явлений, описываемых нелинейным уравнением Шредингера; навыками работы с оптическими справочниками и каталогами оптических материалов.	Опрос в начале каждой лекции, дифференцированный зачет.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Нелинейная фотоника 2».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
Экзамен: – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий, – наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы. При изложении ответа на вопрос(ы) преподавателя обучающийся мог допустить непринципиальные неточности.	<i>Отлично</i>

Экзамен: – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий при наличии незначительных ошибок, – наличие полных ответов на дополнительные вопросы с возможным присутствием ошибок.	<i>Хорошо</i>
Экзамен: – самостоятельность и осмысленность в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации, а также затруднений при формулировке собственных суждений, – корректность применения терминов и понятий, с множественными ошибками, – наличие неполных и/или содержащих существенные ошибки ответов на дополнительные вопросы.	<i>Удовлетворительно</i>
Экзамен: – отсутствие осмысленности, структурированности, логичности и аргументированности в изложении материала, – грубые ошибки в применении терминов и понятий, – отсутствие ответов на дополнительные вопросы.	<i>Неудовлетворительно</i>

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Пример задания для текущего контроля

Рассчитать интенсивность терагерцового излучения при генерации разностных частот в нелинейно-оптическом кристалле ниобата лития

Вопросы, выносимые на экзамен

1. Распространение оптических импульсов в диспергирующей среде
2. Временной профиль гауссовского импульса при распространении в диспергирующей среде
3. Влияние дисперсии высоких (третьего, четвертого) порядков на форму импульсов
4. Временной контраст сверхмощных фемтосекундных импульсов и методы его повышения (XPW)
5. Сжатие оптических импульсов при параметрическом усилении
6. Генерация предельно-коротких фемтосекундных импульсов при неколлинеарном параметрическом усилении в кристаллах
7. Когерентное сложение лазерных излучений
8. Требования к стабильности параметров складываемых излучений
9. Методы реализации режима когерентного сложения оптических полей
10. Генерация терагерцового излучения ультракороткой длительности и высокой интенсивности методом разностной частоты в нелинейных кристаллах

11. Филаментация лазерного излучения в газовых и твердотельных средах
12. Механизмы филаментации
13. Генерация суперконтинуума при филаментации
14. Генерация импульсов минимальной длительности при самосжатии
15. Методы измерения реальной временной формы фемтосекундного оптического импульса (FROG, SPIDER)
16. CEP: физические механизмы возникновения
17. Методы измерения и стабилизации CEP
18. Методы генерации сверхмощных импульсов в лазерных системах на основе параметрического усиления и основные ограничивающие факторы
19. Самообострение оптического импульса и ударные волны огибающей
20. Генерация суперконтинуума в волокнах при возбуждении лазерами с различной длительностью
21. Когерентность генерируемого в волокнах суперконтинуума при распространении в них фемтосекундных импульсов различной длительности
22. Механизмы генерации гармоник высокого порядка
23. Механизмы генерации когерентного гамма излучения
24. Метод измерения длительности аттосекундных импульсов – FROG CRAB

Пример экзаменационного билета

1. Самообострение оптического импульса и ударные волны огибающей
2. Методы измерения и стабилизации CEP
3. Практическое задание: оценить интенсивность лазерного излучения в филаменте в воздухе

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