

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КРИСТАЛЛОГРАФИЯ И ФОТОНИКА»
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
(ФНИЦ «КРИСТАЛЛОГРАФИЯ И ФОТОНИКА» РАН)

Принято на Ученом совете
ИПЛИТ РАН - филиала
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН
Протокол № 4/2020 от 24 сентября 2020 г.

УТВЕРЖДАЮ



Директор
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

О.А.Алексеева

«24» сентября 2020 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
учебной дисциплины

**«ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ЛАЗЕРЫ И
ВЕЩЕСТВО В СИЛЬНОМ СВЕТОВОМ ПОЛЕ»**

направление подготовки **11.06.01** Электроника, радиотехника и системы связи
направленность **05.27.03** Квантовая электроника

Квалификация
Исследователь. Преподаватель-исследователь

Ирина

Шатура

Шатура
2020

1. Цели и задачи дисциплины

Целью освоения дисциплины «Фемтосекундные лазеры и вещество в сильном световом поле» является овладение современными профессиональными знаниями в области квантовой электроники, включая изучение физических процессов генерации и усиления мощного фемтосекундного лазерного излучения, нелинейных самовоздействий и взаимодействий мощных лазерных пучков в оптических средах, диагностику параметров лазерного излучения и вещества, модифицированного под действием сильного и сверхсильного светового поля.

Задачи дисциплины:

- формирование представления об общих принципах генерации и усиления импульсов сверхкороткой (фемтосекундной) длительности и их нелинейно-оптических преобразованиях (удвоение частоты, генерация разностной частоты, параметрическое усиление, вынужденное комбинационное рассеяние);
- изучение методов измерения параметров световых импульсов сверхкороткой длительности;
- изучение физики взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом (газ, конденсированная среда, процессы фазовой самомодуляции, генерация микроплазмы, филаментация);
- изучение основ физики взаимодействия интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов с нанобъектами (генерация кластерных пучков, наноплазма, генерация рентгеновского излучения и нейтронов, ускорение заряженных частиц);
- изучение основ передовых фемтосекундных лазерных технологий (микрообработка материалов, диагностика слоистых мишеней, диагностика микроплазмы и лазерно-индуцированных микромодификаций в объеме прозрачного диэлектрика методом генерации третьей гармоники, дистанционная лазерно-индуцированная эмиссионная спектроскопия вещества в режиме филаментации);
- приобретение практических навыков по генерации кластерных пучков как атомно-молекулярных нанобъектов (вакуумная техника, техника диагностики кластеров методом рэлеевского рассеяния);
- изучение и практическое использование методов и приборов для измерения оптико-физических параметров фемтосекундного лазерного излучения.

2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы аспирантуры

Дисциплина «Фемтосекундные лазеры и вещество в сильном световом поле» (индекс Б1.В.ДВ.2.5) относится к вариативной части программы подготовки аспирантов по направлению подготовки 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи (направленность 05.27.03 Квантовая электроника).

Дисциплина после выбора должна быть освоена аспирантом обязательно (но не обязательно в период обучения, отмеченный в базовом учебном плане).

3. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины

Освоение дисциплины «Фемтосекундные лазеры и вещество в сильном световом поле» направлено на формирование следующих универсальных (УК), общепрофессиональных (ОПК) и профессиональных (ПК) компетенций аспиранта:

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);

ОПК-1 (владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности);

ОПК-2 (владение культурой научного исследования, в том числе с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий);

ПК-1 (способность проводить научные исследования и технические разработки лазеров, приборов, систем и комплексов с использованием лазерного излучения, материалов, эле-

ментно-узловой базы, технологий и специального оборудования с целью развития лазерной техники и лазерных информационных и фотонных технологий и их применения в различных отраслях науки, технике, медицине).

4. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины «Фемтосекундные лазеры и вещество в сильном световом поле» аспирант должен

знать:

- общие понятия о физических механизмах, лежащих в основе генерации и управления параметрами мощных световых импульсов ультракороткой длительности, иметь основные представления о нелинейно-оптических преобразованиях лазерного излучения в иные диапазоны длин волн;
- механизмы поглощения высокоинтенсивного (более 100 ТВт/см^2) электромагнитного излучения в газовых, конденсированных средах и наноструктурированных средах (кластеры);
- перспективные направления исследований в области фемтосекундных лазерных технологий (дистанционная транспортировка энергии лазерного излучения в режимах филаментации, микроплазменной модификации материалов, создание источников излучения ультракороткой длительности в рентгеновском диапазоне и высокоэнергетических частиц (нейтроны, ионы, электроны);
- основные методы измерения параметров фемтосекундных световых импульсов (корреляционные методы измерения длительности светового импульса, методы измерений энергетических и спектральных характеристик, диагностика рентгеновского излучения и параметров высокоэнергетических частиц),

уметь:

- оценить параметры фемтосекундного лазерного излучения, необходимые для создания микроплазмы в газах, кластерах и на поверхности твердотельной мишени;
- оценить результаты воздействия мощного лазерного излучения на газовую и конденсированную среду (уширение спектра лазерного излучения, модификация поверхности мишени);
- пояснить и теоретически описать механизмы поглощения энергии фемтосекундного лазерного излучения газами, кластерами и твердотельной мишенью;
- планировать проведение физического эксперимента,

владеть:

- методами измерения параметров фемтосекундного лазерного излучения (энергия в импульсе, длительность импульса, ширина спектра, пространственное качество светового пучка);
- методами диагностики параметров вещества, модифицированного в результате нелинейно-оптического воздействия на него;
- навыками решения физических задач в области взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения с газами, кластерами и конденсированными средами.

5. Планируемые результаты обучения по дисциплине

(заполняется в соответствии с картами компетенций)

Формируемые компетенции (код компетенции, уровень освоения)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
УК-1	31 (УК-1) Знать методы критического анализа и оценки современных достижений в выбранной области квантовой электроники, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных обла-

	<p>стях.</p> <p>У1 (УК-1) Уметь анализировать альтернативные варианты решения исследовательских и практических задач и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов.</p> <p>В1 (УК-1) Владеть навыками анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</p>
ОПК-1	<p>З1 (ОПК-1) Знать методики анализа современных проблем, способы и методы решения теоретических и экспериментальных задач в выбранной области квантовой электроники.</p> <p>У1 (ОПК-1) Уметь обоснованно выбирать и применять расчетно-теоретические методы для разработки физических и математических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов в выбранной области квантовой электроники.</p> <p>У2 (ОПК-1) Уметь обоснованно выбирать и применять экспериментальные методы исследования для решения научных задач в выбранной области квантовой электроники.</p> <p>В1 (ОПК-1) Владеть современными методами теоретических и экспериментальных исследований для решения задач в выбранной области профессиональной деятельности.</p>
ОПК-2	<p>З1 (ОПК-2) Знать современные информационные технологии, программные продукты и ресурсы сети Интернет для решения задач профессиональной деятельности.</p> <p>У1 (ОПК-2) Уметь использовать профессионально-профилированные знания в области современных информационных технологий, программных продуктов и ресурсов Интернет для решения задач профессиональной деятельности.</p> <p>В1 (ОПК-2) Владеть навыками поиска (в том числе с использованием новейших информационных систем и баз данных) и критического анализа научной и технической информации по тематике проводимых исследований.</p> <p>В2 (ОПК-2) Владеть навыками использования знаний в области информационных технологий, программных продуктов и ресурсов Интернет для решения задач профессиональной деятельности.</p>
ПК-1	<p>З1 (ПК-1) Знать современное состояние науки в области квантовой электроники, тенденции развития фундаментальных исследований и прикладных разработок лазеров и лазерных информационных и фотонных технологий, цели и задачи научных исследований в выбранной области, базовые принципы и методы их организации.</p> <p>З2 (ПК-1) Знать физические и конструкционные особенности лазеров разных типов, современные материалы, компоненты, лазерное диагностическое и технологическое оборудование, технологические процессы производства.</p> <p>У1 (ПК-1) Уметь проводить теоретические и экспериментальные исследования, включающие математическое и компьютерное моделирование, проектирование, конструирование, использование и эксплуатацию материалов, компонентов, приборов, устройств, установок квантовой электроники различного функционального назначения, лазерного технологического и диагностического оборудования.</p> <p>В2 (ПК-1) Владеть навыками исследования, моделирования, проектирования, конструирования и практического применения материалов, компонентов, приборов, устройств, установок квантовой электроники различного функционального назначения, лазерного технологического и диагностического оборудования.</p>

6. Структура и содержание дисциплины

6.1. Структура дисциплины

Вид работы	Семестр			Всего
	3-4			
Общая трудоёмкость, акад. часов	144			144
Аудиторная работа:	32			32
Лекции, акад. часов	16			16
Практические занятия, акад. часов	16			16
Лабораторные работы, акад. часов	-			-
Самостоятельная работа, акад. часов	108			108
Индивидуальные занятия, акад. часов	-			-
Вид итогового контроля (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен) - ЗАЧЕТ	4			4

6.2. Разделы дисциплины

№ раздела	Наименование раздела	Аудиторная работа, трудоёмкость (акад. часов)	Самостоятельная работа, трудоёмкость (акад. часов)
1	Генерация, усиление и нелинейно-оптические преобразования фемтосекундного лазерного излучения.	8	20
2	Вещество в сильном лазерном поле.	18	20
3	Физические основы фемтосекундных лазерных технологий.	6	40
	Итоговая аттестация (зачет)	4	28
	Общая трудоёмкость дисциплины:	36	108

6.3. Лекции

№ лекции	№ раздела	Тематика	Трудоёмкость (акад. часов)
1	1	Фемтосекундные лазеры в фундаментальных и прикладных задачах (обзор). Фемтосекундный лазер. Резонатор с керровской линзой. Фазовая самомодуляция, Минимальная длительность, регулировка длительности импульса с использованием механизма дисперсии групповых скоростей. Физика процессов усиления фемтосекундных лазерных импульсов в УФ, видимом и ИК диапазонах. Прямое усиление. Усиление chirпированных импульсов. Энергия насыщения и максимальная выходная энергия мощной фемтосекундной лазерной системы.	2
2	1	Нелинейно-оптические преобразования фемтосекундного лазерного излучения (генерация гармоник, генерация разностной частоты, параметрическое усиление, вынужденное комбинационное рассеяние). Современные мощные фемтосекундные лазерные системы (УФ, видимого и ИК диапазонов). Адаптивная оптика для мощных фемтосекундных лазерных систем. Методы измерения параметров фемтосекундного лазерного излучения. Особенности измерения длительности фемтосекундных импульсов в УФ диапазоне.	2

3	2	Вещество в сильном и сверхсильном лазерном поле. Нелинейные явления, возникающие при прохождении мощного фемтосекундного лазерного импульса через плотные газы и сверхкритические среды. Керровская самофокусировка и ионизация среды, явление филаментации. Механизмы взаимодействия интенсивного фемтосекундного лазерного излучения с конденсированной средой.	2
4	2	Генерация вандерваальсовых кластеров в газодинамических струях. Характеризация процесса формирования кластера (параметр Хагена). Кластерная наноплазма и лазерно-индуцированные экстремальные состояния вещества с использованием микро- и нанообъектов (кластеров). Смешанные кластеры, условия образования и методы диагностики их существования.	4
5	3	Фемтосекундные импульсы от наноджоульного до джоульного уровня энергии как основа новых технологий. Методы микрообработки вещества в объеме и на поверхности. Дистанционная микрообработка и эмиссионная спектроскопия материалов в режиме филаментации.	2
6	3	Лазерно-плазменные источники рентгеновского излучения сверхкороткой длительности, генерация высокоэнергетических частиц.	4
<i>Общая трудоемкость лекций:</i>			16

6.4. Практические занятия

№ раздела	№ практического занятия	Тематика	Трудоёмкость (акад. часов)
1	1	Изучение схемы и режима эксплуатации титан-сапфировой фемтосекундной лазерной системы и ее измерительно-диагностического комплекса. Приобретение практических навыков проведения экспериментальных исследований с использованием мощного фемтосекундного лазерного излучения.	4
2	2	Изучение схемы функционирования газо-вакуумной системы, методов контроля остаточного газа и напуска рабочего газа в систему генерации кластерного пучка.	2
2	3	Создание измерительной схемы для диагностики параметров кластерного пучка методом рэлеевского рассеяния. Оценка результатов проведенных измерений.	4
2	4	Наладка ПЗС камеры для мониторинга пространственного положения филамента, создаваемого фемтосекундным лазером при распространении через газо-кластерную среду.	4
2	5	Изучение работы рентгеновского спектрометра Amptek. Проведение методических измерений с использованием генерации наноплазмы в аргоновом кластерном пучке.	2
<i>Общая трудоемкость практических занятий:</i>			16

6.5. Самостоятельные занятия

№ раздела	Вид самостоятельной работы	Трудоёмкость (акад. часов)
1	Работа с лекционным материалом. Самостоятельное изучение темы и подготовка реферата: Генерация кластерных пучков при адиабатическом расширении атомарного и молеку-	20

	лярного газа в вакуум. Оценка параметров кластерного пучка при заданном профиле сопла.	
2	Работа с лекционным материалом. Самостоятельное изучение темы и подготовка реферата: Филаментация фемтосекундного лазерного излучения при распространении в газах и кластерных средах	20
3	Работа с лекционным материалом. Самостоятельное изучение темы и подготовка реферата: Генерация характеристического и тормозного рентгеновского излучения при воздействии интенсивного фемтосекундного лазерного излучения на кластерный пучок	20
3	Работа с лекционным материалом. Самостоятельное изучение темы и подготовка реферата: Генерация высокоэнергетических частиц при воздействии интенсивного фемтосекундного лазерного излучения на атомно-молекулярный кластерный пучок.	20
	Подготовка к итоговой аттестации (зачету)	28
	Общая трудоемкость самостоятельной работы:	108

Руководитель дисциплины оставляет за собой право уточнять тематику и форму проведения аудиторных занятий.

Основная часть работы аспиранта является самостоятельной и включает изучение рекомендованной руководителем дисциплины литературы, работу с источниками, написание текстов, составление и защиту презентаций, подготовку к итоговому собеседованию и т.п.

По согласованию с руководителем дисциплины возможно проведение индивидуальных консультаций и собеседования с руководителем дисциплины.

В случае отсутствия аудиторных занятий или невозможности их посещения руководитель дисциплины предлагает аспиранту соответствующую отработку с тем же объемом оценки проделанной работы.

7. Аттестационные критерии

От аспиранта требуется посещение занятий, выполнение заданий руководителя дисциплины, знакомство с рекомендованной литературой и современными научными приборами. По согласованию с научным руководителем возможна подготовка зачетной письменной работы (реферата, аналитической записки, обзора источников или литературы и т.п.). При аттестации аспиранта оценивается качество работы на занятиях (умение вести научную дискуссию, способность четко и ёмко формулировать свои мысли), уровень подготовки к самостоятельной научно-исследовательской деятельности в избранной области, качество выполнения заданий (презентаций, докладов, аналитических записок и др.).

8. Требования к итоговой аттестации по дисциплине

Итоговая аттестация для дисциплины проводится в форме зачета.

Условия аттестации, а также вопросы для повторения (контрольные вопросы) и задания руководителя дисциплины определяются в начале курса. Обучающийся должен показать владение предметом, знание рекомендованных статей и монографий, материалов конференций и т.п., умение выполнять устные и письменные задания руководителя дисциплины.

9. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы

9.1. Перечень и карта компетенций дисциплины «Фемтосекундные лазеры и вещество в сильном световом поле»

2. С.А. Ахманов, В.А. Выслоух, А.С. Чиркин, Оптика фемтосекундных лазерных импульсов, М., Физматлит, 1988.
3. Мощные пико-и фемтосекундные лазерные системы; вещество в сверхсильных световых полях, Итоги Науки и Техники, сер. Современные проблемы лазерной физики, ред. Ахманов С.А., М., 1991, т.4, 244 с.
4. Лютер-Дэвис Д., Гамалий Е.Г., Янжи Ванг и др. Вещество в сверхсильном световом поле, Квантовая Электроника, т.19 (4), 317-359 (1992).
5. Р.В. Волков, В.М. Гордиенко, М.С. Джиджоев, М.А. Жуков, П.М. Михеев, А.Б. Савельев, А.А. Шашков, Квантовая электроника, 24 (12), 1114 (1997).
6. A.V. Kudryashov, V.B. Kulakov, Ye.V. Kotsuba, V.Ya. Panchenko, V.I. Samarkin, Low cost adaptive optical devices for multipurpose applications, Proc. SPIE **3688**, 469 (1999).
7. Александров А.Г., Завалов В.Е., Кудряшов А.В., Панченко В.Я., Рукосуев А.Л., Самаркин В.В. Адаптивная оптика для мощных лазеров со сверхкороткими импульсами излучения, Сб. трудов ИПЛИТ РАН, 55-70 (2005).
8. В.П. Вейко, М.Н. Либенсон, Г.Г. Червяков, Е.Б. Яковлев, Взаимодействие лазерного излучения с веществом, М., Физматлит, 2008.
9. А.В. Андреев, В.М. Гордиенко, А.Б. Савельев, Ядерные процессы в высокотемпературной плазме, инициируемой сверхкоротким лазерным импульсом, Квантовая электроника, 31 (11), 941 (2001).
10. В.П. Крайнов, Б.М. Смирнов, М.Б. Смирнов, Фемтосекундное возбуждение кластерных пучков, УФН, 177 (9), 953 (2007).
11. V.M. Gordienko, M.S. Dzhidzhoev, I.A. Zhvaniya, V.T. Platonenko, D.N. Trubnikov, D.O. Fedorov, Hard X-ray generation and plasma filament formation under interaction of femtosecond laser pulses with large molecular clusters, Eur. Phys. J. D (2013) 67: 55.
12. Г.Н. Макаров, Лазерная ИК фрагментация кластерных молекулярных кластеров: роль каналов ввода и релаксации энергии, влияние кружения, динамика фрагментации, УФН, 187 (3), 241 (2017).

Дополнительная литература

1. А.В. Коржиманов, А.А. Гоносков, Е.А. Хазанов, А.М. Сергеев, Горизонты петаваттных лазеров, УФН, 181 (1), 9-32 (2011).
2. E.G. Gamaly, L. Rapp, V. Roppo, S. Juodkazis, A.V. Rode, Generation of high energy density by fs-laser-induced confined microexplosion, *New J. Phys.* **15**, 025018 (2013).
3. F. Potemkin, E. Mareev, Y. Bezudnova, V. Platonenko, B. Bravy, V. Gordienko, Controlled energy deposition and void-like modification inside transparent solids by two-color tightly focused femtosecond laser pulses, *Applied Physics Letters*, **110**, 163903 (2017).

Периодические издания, электронные ресурсы, включая доступ к базам данных и т.п.

РИНЦ	https://elibrary.ru/orgs.asp
Web of Science	http://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=F2LiEv3BvmxwoCqmOmV&preferencesSaved=
Scopus	https://www.scopus.com/home.uri
Google Scholar citations	https://scholar.google.ru/citations?user=NbJEoV8A-AAAJ&hl=ru
IOP Institute of Physics материалы компании IOP Publishing Limited, а именно, база данных IOP Journal	http://www.iop.org/

AIP материалы компании American Institute of Physics	https://www.aip.org/
CASC материалы издательства EBSCO Publishing, а именно база данных CASC	https://www.ebsco.com/e/ru-ru/products-and-services/research-databases
APS Журналы Американского физического общества база данных APS Online Journals	https://www.aps.org/
IEEE материалы компании The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, а именно, база данных IEEE/IEL	http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp
RSC материалы Royal Society of Chemistry	http://pubs.rsc.org/
Wiley материалы компании John Wiley & Sons Ltd., а именно база данных Wiley Journals	http://onlinelibrary.wiley.com/
Inspec материалы издательства EBSCO Publishing, а именно база данных INSPEC	https://www.ebsco.com/e/ru-ru/products-and-services/research-databases/inspec
ProQuest материалы компании и PROQUEST LLC, а именно база данных Proquest Dissertations and Theses Global	https://www.proquest.com/products-services/pqdtglobal.html
SpringerNature Зарубежные электронные ресурсы издательства, а именно: Springer Journals Springer Protocols Springer Materials Springer Reference zbMATH Nature Journals Nano Database	http://link.springer.com/ http://www.springerprotocols.com/ http://materials.springer.com/ http://link.springer.com/search?facet-content-type=%22ReferenceWork%22 http://zbmath.org/ http://npg.com/ https://nano.nature.com
Elsevier B.V. Science Direct Complete Freedom Collection зарубежные электронные ресурсы издательства Elsevier «Freedom Collection» и коллекция электронных книг «Freedom Collection eBook collection», размещенных на платформе Science Direct	https://www.elsevier.com/
CCDC - Cambridge Crystallo-	

graphic Data Centre Зарубежные электронные ресурсы Кембриджского центра структурных данных	https://www.ccdc.cam.ac.uk/
Scifinder База данных	https://scifinder.cas.org

11. Образовательные технологии

Курс имеет электронную версию для презентации. Лекции читаются с использованием современных мультимедийных возможностей и проекционного оборудования.

12. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: компьютер и мультимедийное оборудование (проектор), доступ к сети Интернет, учебная доска.

Научные приборы: фемтосекундная лазерная система, рентгеновский спектрометр Amptek, генератор атомно-молекулярного кластерного пучка, лазерное диагностическое оборудование Центра коллективного пользования ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Программу составили:

д.ф.-м.н., академик В.Я. Панченко

д.ф.-м.н., профессор В.М. Гордиенко