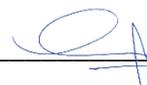


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова  
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова  
в городе Сарове

**УТВЕРЖДАЮ**



Директор филиала МГУ в г. Сарове  
член-корреспондент РАН В.В.Воеводин

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

**Наименование дисциплины:**

СОВРЕМЕННАЯ АДАПТИВНАЯ ОПТИКА

---

**Уровень высшего образования:**

Магистратура

---

**Направление подготовки:**

03.04.02 Физика

---

**Направленность (профиль) ОПОП:**

Лазерная нелинейная оптика и фотоника

---

Квалификация «Магистр»

**Форма обучения:** Очная

---

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика в редакции приказа по МГУ от 30 декабря 2020 г. №1366.

**Авторы–составители:**

К.ф.-м.н., научный сотрудник Андреева Мария Сергеевна, кафедра общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины**

### **«Современная адаптивная оптика»**

---

В курсе изучаются теоретические вопросы из области формирования изображений в когерентных и некогерентных оптических системах, рассматриваются способы описания случайных фазовых aberrаций, а также основные принципы функционирования современных адаптивных оптических систем и их элементная база. В курсе рассматриваются такие физические методы как фазовое сопряжение, апертурное зондирование, обращение волнового фронта, и такие научно-практические задачи как улучшение качества изображений в астрономии, управление фокусировкой лазерного пучка в турбулентной атмосфере, формирование опорных источников в атмосфере, оптимальное управление фазовыми корректорами, повышение разрешения изображений сетчатки в офтальмологии, адаптивная коррекция излучения мощных фемтосекундных лазеров, применение адаптивной коррекции в задачах микроскопии и генерации терагерцового излучения.

#### **Разделы рабочей программы**

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
4. Форма обучения.
5. Язык обучения.
6. Содержание дисциплины.
7. Объем дисциплины
8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.
10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
11. Шкала оценивания.
12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

### 1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

В результате освоения дисциплины «Современная адаптивная оптика» обучающийся кроме знаний предмета получает навыки применения ранее полученных знаний для решения новых научных и практических задач.

### 2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Освоение дисциплин «Оптика», «Электромагнетизм», «Электродинамика», «Математический анализ», «Статистическая физика», «Дифференциальные уравнения», «Теория колебаний», «Теория волн», «Нелинейные волны и нелинейная оптика».

### 3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

<b>Формируемые компетенции (код компетенции)</b>	<b>Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)</b>
Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1)	<p><b>Знать</b> основные законы и направления современных научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p> <p><b>Уметь</b> на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники, определять возможные направления научных исследований.</p> <p><b>Владеть</b> необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p>
Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2)	<p><b>Знать</b> базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном научном оборудовании в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p> <p><b>Уметь</b> используя знания в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники проводить научные исследования.</p> <p><b>Владеть</b> навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.</p>

<p>Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники (СПК-3).</p>	<p><b>Знать</b> основные направления инновационного развития в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p> <p><b>Уметь</b> проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.</p> <p><b>Владеть</b> методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p>
---	---

4. **Форма обучения:** очная

5. **Язык обучения:** русский

6. **Содержание дисциплины:**

**Тема 1. Обзор проблем адаптивной оптики**

Задачи управления параметрами оптической системы. Повышение углового разрешения астрономических телескопов и ограничения, вносимые атмосферной турбулентностью. Фазировка многозеркальных телескопов. Звездный интерферометр Майкельсона. Фокусировка лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Обращение волнового фронта и фазовое сопряжение. Проблема спеклов. Компенсация оптических внутрирезонаторных неоднородностей в лазерах и проблема формирования дифракционно-ограниченных пучков.

**Тема 2. Формирование изображений в оптических системах**

Линейные оптические системы и способы их описания. Преобразование комплексной амплитуды. Импульсная реакция и передаточная функция. Учет aberrаций. Обобщенный принцип Гюйгенса-Френеля. Передаточная функция оптической системы с aberrациями. Некогерентные системы. Оптическая передаточная функция (ОПФ) и частотно-контрастная характеристика изображающей системы. Число Штреля и пространственное разрешение системы, их зависимость от величины aberrаций. Разложение aberrаций по ортогональным функциям. Свойства ортонормированных систем функций. Полиномы Цернике. Коэффициенты aberrаций.

**Тема 3. Датчики волнового фронта**

Измерение локальных наклонов волнового фронта оптического излучения. Принципиальные ограничения: дробовой шум фотонов, шумы фотоприемника. Сдвиговые интерферометры: вращающиеся дифракционные решетки, двухканальная и совмещенная схемы; оценки чувствительности. Интерферометр поперечного сдвига с голографическим фильтром; интерферометр радиального сдвига. Характеристики современных схем датчиков ВФ. Датчик кривизны ВФ. Датчик Шака-Гартмана. Позиционная характеристика; оценки точности и чувствительности. Восстановление ВФ по измеренным локальным наклонам:

зональный и модальный методы. Вычисление коэффициентов aberrаций; разложение по функциям отклика корректора.

#### **Тема 4. Аберрации в турбулентной атмосфере**

Случайные фазовые aberrации и способы их описания. Корреляционная матрица aberrационных коэффициентов. Усредненные характеристики оптической системы. Средняя квадратичная фазовая ошибка. Приближенные выражения для разрешения системы и числа Штреля. Атмосферные aberrации. Флуктуации показателя преломления в турбулентной атмосфере. Структурная функция флуктуаций фазы. Радиус корреляции (Фридовский радиус). ОПФ и число Штреля в случае фазовых флуктуаций. Корреляция коэффициентов aberrаций в атмосфере. Выражение корреляционных коэффициентов через структурную функцию фазы. Зависимость дисперсии коэффициентов от размера апертуры и радиуса корреляции. Анизопланатизм адаптивных систем. Угол изопланатизма идеальной адаптивной системы в турбулентной атмосфере. Влияние флуктуаций средней фазы и наклонов ВФ. Анизопланатизм при модальной коррекции. Длинноэкспозиционные и короткоэкспозиционные изображения. Способы расширения поля зрения адаптивной системы. Методы улучшения качества зарегистрированных изображений.

#### **Тема 5. Методы адаптивной оптики**

Компенсация фазовых aberrаций управляемыми фазовыми корректорами. Типы корректоров и схемы их применения. Адаптивные оптические системы. Идеальный модальный корректор ВФ. Потенциальная эффективность модального корректора при компенсации атмосферных искажений. Выражение для остаточной квадратичной ошибки. Распределение остаточной ошибки по апертуре в зависимости от числа степеней свободы корректора. Способы управления корректором в адаптивных системах. Типичные схемы адаптивных систем. Системы фазового сопряжения и апертурного зондирования. Структура управления системами с датчиком ВФ. Источники погрешностей и их вклад в общую остаточную ошибку. Организация поиска максимума в системах апертурного зондирования. Выбор критерия качества. Проблема локальных экстремумов. Достоинства и недостатки систем апертурного зондирования.

#### **Тема 6. Прикладные аспекты адаптивной оптики**

Методы высокоразрешающей фазовой коррекции. Жидкокристаллические пространственные модуляторы фазы и адаптивные системы с оптической обратной связью. Основное уравнение системы; принципиальные ограничения. Методы визуализации фазовых искажений: дефокусировка и свободное распространение; преобразование Гильберта; интерферометр поперечного сдвига и голографический фильтр; интерферометр радиального сдвига.

Проблема опорного источника в астрономии. Методы создания искусственных опорных источников: Рэлеевское рассеяние в атмосфере; использование натриевых слоев, возбуждаемых лазерным излучением. Проблема измерения средних наклонов. Анизопланатизм измерения ВФ с использованием искусственного опорного источника. Системы с многими опорными источниками.

Использование адаптивной оптики в современной офтальмологии: измерение aberrаций глаза человека; повышение разрешения изображений сетчатки в ретиноскопии; мультиспектральная ретиноскопия. Использование адаптивной оптики в задачах коррекции излучения мощных фемтосекундных лазеров. Системы адаптивной оптики в задачах микроскопии. Применение систем адаптивной оптики в задачах генерации терагерцового излучения.

## 7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Самостоятельная работа студентов
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Адаптивная оптика	2	72	36	18	18	36

## 8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Современная адаптивная оптика» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса, обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным занятиям, выполнения домашних заданий. Промежуточный контроль в виде коллоквиума (1 раз в середине семестра) и 15-минутных проверочных работ по каждой изученной теме курса. По вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Всего часов	Лекции	Научно- практические занятия	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Обзор проблем адаптивной оптики	11	3		3	5	Собеседование, опрос
2	Формирование изображений в оптических системах	12	3	-	3	6	
3	Датчики волнового фронта	11	3	-	3	5	

4	Аберрации в турбулентной атмосфере	11	3		3	5	
5	Методы адаптивной оптики	11	3		3	5	
6	Прикладные аспекты адаптивной оптики	12	3		3	6	
	Промежуточная аттестация	4				4	Экзамен в устной форме
<b>ИТОГО:</b>		<b>72</b>	<b>18</b>	<b>-</b>	<b>18</b>	<b>36</b>	

## 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Современная адаптивная оптика» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности слушателей, качества ответов на вопросы лектора, аргументированности позиции студента, оценивается широта используемых им теоретических знаний. В семестре в конце некоторых лекций проводятся несколько коротких контрольных работ (10 – 15 минут).

Промежуточная аттестация по дисциплине «Современная адаптивная оптика» проводится в форме экзамена. Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

## 10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

### Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
<b>Оценочные средства текущего контроля</b>		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как короткий письменный ответ на поставленный вопрос по тематике предыдущей или текущей лекции, рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины

	позиции.	
<b>Оценочные средства промежуточной аттестации</b>		
Короткая письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к экзамену

## 11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
<b>ЗНАТЬ:</b> принципы работы систем адаптивной оптики  ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний принципов работы систем адаптивной оптики	В целом успешные, но не систематические знания принципов работы систем адаптивной оптики	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания принципов работы систем адаптивной оптики	Успешные и систематические знания принципов работы систем адаптивной оптики
<b>УМЕТЬ:</b> работать с системами адаптивной оптики  ОПК-3.Б У-6	Отсутствие умения работать с системами адаптивной оптики	В целом успешное, но не систематическое умение работать с системами адаптивной оптики	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение работать с системами адаптивной оптики	Успешное и систематическое умение работать с системами адаптивной оптики
<b>ВЛАДЕТЬ:</b> методами описания и расчета систем адаптивной оптики ОПК-3.Б В-6	Отсутствие/фрагментарное владение методами описания и расчета систем адаптивной оптики	В целом успешное, но не систематическое владение методами описания и расчета систем адаптивной оптики	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение методами описания и расчета систем адаптивной оптики	Успешное и систематическое владение методами описания и расчета систем адаптивной оптики

## **12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.**

*Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:*

*Пример:*

1. Вывод формулы для когерентной передаточной функции пустого пространства.
2. Вывод формулы для ОПФ круглой линзы.
3. Вывод формул для амплитудной решетки Ронки.
4. Вывод уравнения Эйлера для наилучшей оценки фазы в присутствии измерительного шума
5. Вывод формулы для структурной функции фазы в случае плоской волны.
6. Вывод формулы для структурной функции фазы в случае сферической волны.
7. Вывод формулы для результирующей интенсивности в методе многоканальной фазовой модуляции.

Типовые темы для обсуждения на коллоквиумах:

1. Формирование изображений в некогерентных оптических системах.
2. Датчик кривизны волнового фронта.
3. Датчик Шака-Гартмана.
4. Сдвиговые интерферометры как датчики волнового фронта.
5. Статистическое описание атмосферной турбулентности.
6. Анизопланатизм адаптивных систем.
7. Корректоры волнового фронта.
8. Эффективность адаптивной коррекции фазы методом фазового сопряжения.
9. Метод апертурного зондирования.
10. Адаптивные системы с оптической обратной связью.
11. Методы адаптивной оптики в офтальмологии.
12. Методы адаптивной оптики в астрофизических исследованиях.
13. Методы адаптивной оптики для коррекции мощного лазерного излучения
14. Методы адаптивной оптики в задачах микроскопии
15. Методы адаптивной оптики в задачах генерации терагерцового излучения

## **13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.**

*Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме экзамена:*

1. ОПФ оптической системы. Определение и геометрическая интерпретация.
2. ОПФ круглой линзы (график).
3. Обобщенная функция зрачка.
4. Функция отклика изображающей системы.
5. Влияние фазовых аберраций на ОПФ. Инверсия контраста изображения.
6. Фактор Штреля.
7. Принцип действия датчика кривизны волнового фронта.
8. Классификация сдвиговых интерферометров.
9. Схема и принцип работы интерферометра бокового сдвига.
10. Гетеродинный интерферометр поперечного сдвига.
11. Принцип действия датчика Шака-Гартмана.
12. Модальный метод реконструкции волнового фронта.

13. Зональный метод реконструкции волнового фронта.
14. Разложение волнового фронта по полиномам Цернике.
15. Структурная функция фазы. Корреляционная функция фазы.
16. Колмогоровская модель турбулентности.
17. Структурная постоянная  $C_n^2$ . Характерные значения для «сильной» и «слабой» турбулентности.
18. Радиус Фрида.
19. Коэффициенты Нолла.
20. Анизопланатизм адаптивных систем. Угол изопланатизма.
21. Методы расширения поля зрения адаптивных систем в условиях анизопланатизма.
22. Метод фазового сопряжения.
23. Структура остаточной ошибки коррекции по методу фазового сопряжения.
24. Идеальный корректор Цернике. Зависимость ошибки коррекции от  $N$ .
25. Классификация корректоров волнового фронта (адаптивных зеркал).
26. Основные параметры корректоров волнового фронта.
27. Сегментированные адаптивные зеркала.
28. Зеркала со сплошной деформируемой поверхностью.
29. Интегральные критерии качества работы адаптивных систем.
30. Метод наискорейшего спуска.
31. Стохастическая градиентная оптимизация.
32. Многоканальная фазовая модуляция.
33. Модуляционная характеристика ЖК-ПВМС.
34. Способы визуализации фазы.
35. Измерение волнового фронта при использовании естественных источников.
36. Рэлеевские опорные источники.
37. Натриевые опорные источники.
38. Эффект конуса и проблема наклона при формировании опорных источников.
39. Человеческий глаз как оптическая система.
40. Применение адаптивной оптики в задачах офтальмологии.
41. Применение адаптивной оптики для коррекции мощного лазерного излучения
42. Применение адаптивной оптики в задачах микроскопии
43. Применение адаптивной оптики в задачах генерации терагерцового излучения

#### **14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы**

Основная литература.

1. Дж. Гудмен Введение в Фурье-оптику. Москва, Мир 1970.
2. В.А.Зверев Радиооптика. М., Сов. радио, 1975.
3. М.А.Воронцов, А.В.Корябин, В.И.Шмальгаузен. Управляемые оптические системы. М. Наука, 1988.
4. М.А.Воронцов, В.И.Шмальгаузен. Принципы адаптивной оптики. М. Наука, 1986.
4. Адаптивная оптика. Сборник статей. М., Мир, 1980.
5. Дж. Харди Активная оптика. ТИИЭР, т.66, №6, 1979.

#### Дополнительная литература.

1. Шанин О.И. Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. М.:Техносфера, 2013
2. Большасова Л.А. Адаптивная коррекция атмосферных искажений оптических изображений на основе искусственного опорного источника. М. ФИЗМАТЛИТ, 2012
3. Бебчук Л.Г. Прикладная оптика: учебное пособие для ВУЗов по направлению 200200. Санкт Петербург, Лань, 2009

#### Интернет-ресурсы.

- <http://www.astronet.ru/db/msg/1205112>
- [ofvp.phys.msu.ru/science\\_education/lections/detail.php?ID=740](http://ofvp.phys.msu.ru/science_education/lections/detail.php?ID=740)

#### Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Для лекционной части курса требуется аудитория, оборудованная мультимедийным проектором, интерактивной доской, и управляющим компьютером. Также необходимо наличие экрана и обычной учебной доски.