

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:**

ЛАЗЕРНАЯ МИКРОСКОПИЯ

---

**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., ассистент Шутова Ольга Анатольевна, кафедра общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ

## Аннотация к рабочей программе дисциплины

### «Лазерная микроскопия»

---

В курсе изучаются методы современной оптической микроскопии сверхвысокого разрешения. Курс состоит из трех частей в соответствии с тенденциями развития оптических средств визуализации со сверхразрешением в настоящее время. Дисциплина по выбору читается на 1м году обучения в 2 ом семестре

Первая часть посвящена ближнепольной микроскопии, дан обзор всех существующих в настоящее время типов ближнепольных микроскопов, физических принципов их работы, областей применения. Обзор экспериментальных методов предваряется теоретическим введением в электродинамику ближнего поля. Вторая часть касается микроскопии на основе метаматериалов и дифракционной нанофотоники, в ней описаны основы физической оптики метаматериалов, прослежена история развития микроскопии на основе метаматериалов от изначальной чисто теоретической идеи суперлинзы Пендри до современных реализаций, выводится обобщенный закон Снеллиуса для метаповерхности. Третья часть посвящена современной микроскопии сверхвысокого разрешения в дальнем поле. В данном разделе обсуждаются три группы методов дальнепольной микроскопии: на основе структурированной подсветки, STED-микроскопия, локализационная микроскопия, показано, в каких случаях удастся достигать пределов разрешения до единиц нанометров. Дана оценка горизонта возможностей разных методов микроскопии, проведен их сравнительный анализ.

#### 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 «Основы фотоники» обучающийся кроме знаний предмета получает навыки применения ранее полученных знаний для решения новых научных и практических задач.

Дисциплина читается во 2 семестре и относится к вариативной части программы (курс по выбору)

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

Освоение дисциплин «Электромагнетизм», «Электродинамика», «Оптика», «Математический анализ», «Квантовая механика», «Дифференциальные уравнения», «Теория колебаний», «Теория волн».

### 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	<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>

информационных технологий (СПК-2)	
Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники (СПК-3).	<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. Введение в оптическую микроскопию.* История развития оптической микроскопии от первого двухлинзового микроскопа до формулировки дифракционного предела разрешения оптических систем Аббе, Рэля, Спэрроу. Фундаментальная неустранимость дифракционных явлений из оптической системы и методы воздействия на них. Методы повышения качества изображения. Поляризационная микроскопия. Фазовый контраст. Иммерсионный принцип. Гистологическое подкрашивание. Флуоресцентная микроскопия. Конфокальная микроскопия. Виды aberrаций и их коррекция. «Недифрагирующие» (бесселевы) пучки, формируемые на аксиконе.

*Тема 2. Ближнепольная оптическая микроскопия.* Электродинамика ближнего поля. Перенос энергии ближним полем. Ближнее поле вблизи плоской поверхности, субволнового отверстия, конического острия. Опыт Л.И. Мандельштама по наблюдению эванесцентных (неоднородных) волн. Нарушенное полное внутреннее отражение. Сдвиг пучка Гуса-Хенхен и Имберта-Фёдорова. Отклонение направления распространения отраженного пучка от зеркального. Решение Бёте-Баукампа о прохождении света через круглое отверстие. Решение Ричардса-Вольфа о поле остророфокусированного пучка. Апертурная и безапертурная ближнепольная оптическая микроскопия. Нелинейная ближнепольная микроскопия.

*Тема 3. Дифракционная нанофотоника.*

Массив отверстий как линза. Линза Микаэляна и другие виды структурирования. Сверхосцилляции. Метаматериал. Линза Пендри и линза Веселаго. Анизотропный метаматериал. Метаповерхность. Обобщенный закон Снеллиуса. Активные метаматериалы.

*Тема 4. Дальнепольная оптическая микроскопия.* Микроскопия на основе гашения флуоресценции. STED –микроскопия и родственные методы. Микроскопия на основе структурированной подсветки. Фурье-анализ в микроскопии. Локализационная микроскопия. Фотопереключаемые белки и квантовые точки для оптической микроскопии.

*Тема 5. Поляризация в микроскопии. Фаза Панчаратнама-Берри.* Фаза Панчаратнама-Берри в оптике. Роль поляризации в современной микроскопии. Управление положением пучка с

помощью фазы Панчаратнама-Берри. Преобразование состояния поляризации пучков и направления распространения с помощью метаповерхности.

## 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	
Лазерная микроскопия	2	72	34	17	17	38

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

Изучение курса «Лазерная микроскопия» 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, краткие выступления с докладами по наиболее близким НИР студентов темам. 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	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Введение в оптическую микроскопию.	16	4		4	8	Собеседование, опрос
2	Ближнепольная оптическая микроскопия.	16	4	-	4	8	

3	Дифракционная нанофотоника	16	4	-	4	8	
4	Дальнепольная оптическая микроскопия.	12	3		3	6	
5	Поляризация в микроскопии. Фаза Панчаратнама-Берри	8	2		2	6	
	Промежуточная аттестация	4				4	Зачет в устной форме
<b>ИТОГО:</b>		<b>72</b>	<b>17</b>	<b>-</b>	<b>17</b>	<b>38</b>	

### 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Лазерная микроскопия» 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 «Лазерная микроскопия» проводится в форме зачета.

### 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 позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
<b>Оценочные средства промежуточной аттестации</b>		
Короткая письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к зачету

## 11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
<b>ЗНАТЬ:</b> Принципы работы оптических средств визуализации со сверхразрешением ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний принципов работы оптических средств визуализации со сверхразрешением	В целом успешные, но не систематические знания принципов работы оптических средств визуализации со сверхразрешением	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания принципов работы оптических средств визуализации со сверхразрешением	Успешные и систематические знания принципов работы оптических средств визуализации со сверхразрешением
<b>УМЕТЬ:</b> производить расчет необходимых в заданных условиях параметров оптических систем визуализации, оценку их разрешающей способности ОПК-3.Б У-6	Отсутствие умения производить расчет необходимых в заданных условиях параметров оптических систем визуализации, оценку их разрешающей способности	В целом успешное, но не систематическое умение производить расчет необходимых в заданных условиях параметров оптических систем визуализации, оценку их разрешающей способности	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение производить расчет необходимых в заданных условиях параметров оптических систем визуализации, оценку их разрешающей способности	Успешное и систематическое умение производить расчет необходимых в заданных условиях параметров оптических систем визуализации, оценку их разрешающей способности
<b>ВЛАДЕТЬ:</b> методами описания и расчета оптических средств визуализации со сверхразрешением ОПК-3.Б В-6	Отсутствие/фрагментарное владение методами описания и расчета оптических средств визуализации со сверхразрешением	В целом успешное, но не систематическое владение методами описания и расчета оптических средств визуализации со сверхразрешением	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение методами описания и расчета оптических средств визуализации со сверхразрешением	Успешное и систематическое владение методами описания и расчета оптических средств визуализации со сверхразрешением



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

### ***Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:***

#### ***Пример:***

1. На чем основан принцип метода фазового контраста. Позволяет ли он повысить разрешающую способность оптической системы.
2. Пусть в фокусе линзы с числовой апертурой  $NA$  находится молекула, положение которой на выходной CCD камере мы можем фиксировать с точностью  $10$  нм. Теперь расположим на расстоянии  $d$  от молекулы наночастицу радиуса  $R$ . Теперь на выходной камере мы наблюдаем излучение двух когерентных диполей, молекулы и наведенного в наночастице диполя. Оцените, как, в зависимости от геометрии задачи, повлияет добавление наночастицы на разрешающую способность оптической системы. Сделайте выводы о том, как улучшить разрешающую способность и по возможности избежать артефактов.
3. Предположим, что мы хотим получить в дальнем поле изображение слоя флуоресцентных молекул, плотность которых меняется по синусоидальному закону с периодом меньше критерия Рэлея. Наложите на подсветку структурирование так, чтобы можно было определить период функции плотности флуоресцентных молекул. Изобразите соответствующие картинки Муара. Коэффициенты преломления считать приблизительно равными  $1$ .
4. Объясните связь между критерием Рэлея и принципом неопределенности Гейзенберга.

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

### ***Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме зачета:***

1. Основные свойства оптической микроскопии (ОМ). Место ОМ среди других методов визуализации мельчайших объектов, электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, рентгеновской микроскопии, преимущества и недостатки.
2. Критерий Рэлея. Направления оптической микроскопии после формулировки этого критерия.
3. Флуоресцентные молекулы и их роль в микроскопии. Возбуждение. Релаксация.
4. Тензорная функция Грина. Излучение диполя в дальней, средней и ближней зоне.
5. Эванесцентные поля. Эксперимент Л.И. Мандельштама. Перенос энергии затухающим полем. Полное внутреннее отражение и нарушенное полное внутреннее отражение.
6. Сдвиг Гуса-Хенхен и сенсорные устройства на его основе.
7. Угловые распределения оптических полей. Угловое распределение поля диполя.
8. Пропагаторы поля. Параксиальное приближение для оптических полей. Гауссовы лазерные пучки. Лазерные моды более высокого порядка. Продольные поля в фокальной области.
9. Карта ориентации излучателей. Поляризаационное хранение информации.
10. Поляризованные электрические и магнитные поля. Угловой спектр поля в дальней зоне. Фокусировка полей. Фокальные поля. Фокусировка лазерных мод высокого порядка. Передел слабой фокусировки. Фокусировка вблизи плоских поверхностей.
11. Функция рассеяния точки. Предел(ы) разрешения. Повышение предела разрешения путем селективного возбуждения. Осевое разрешение.
12. Увеличение разрешения посредством насыщения. Принципы конфокальной микроскопии. Осевое разрешение в многофотонной микроскопии.
13. Основные положения теории оптической антенны.
14. Принципы микроскопии ближнего поля. Передача информации из ближней зоны в дальнюю.

15. Излучение и детектирование в дальнем поле. Метод фазового контраста. Поляризационная микроскопия. Конфокальная микроскопия.
16. Подсветка в ближнем поле и детектирование в дальнем поле. Апертурное сканирование в оптической микроскопии ближнего поля. Сильнопольная сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля.
17. Подсветка в дальнем поле и детектирование в ближнем поле. Сканирующая туннельная оптическая микроскопия. Многомодовая оптическая микроскопия ближнего поля. Подсветка в ближнем поле и детектирование в ближнем поле. Микроскопия на основе переноса энергии и другие схемы.
18. Понятие о метаматериалах. Типы метаматериалов. Физические принципы получения отрицательного показателя преломления.
19. Микроскопия на основе метаматериалов. Идеальная линза Пендри. Суперлинза Фанга. Гиперлинза.
20. Диполь-дипольное взаимодействие и перенос энергии. Мультипольное разложение кулоновского взаимодействия. Резонансный безызлучательный перенос энергии между двумя частицами (FRET). Делокализованные возбуждения (сильная связь). Перепутанные состояния.
21. Микроскопия на основе гашения флуоресценции. Работы группы Штефана Хеля.
22. Обзор типов оптических зондов. Методы создания оптических зондов.
23. Фаза Панчаратнама-Берри в оптике.
24. Управление положением центра пучка при помощи фазы Панчаратнама-Берри.
25. Метаповерхности для управления поляризацией.

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

##### Основная литература

1. В.В. Климов «Наноплазмоника» », Издательство ФИЗМАТЛИТ, Москва, Россия, 2010.
2. Е.С. Андрианов и др. «Квантовая наноплазмоника. Учебное пособие». Издательство «Интеллект», Москва, Россия, 2015.
3. A. Zayats, D.Richards, «Nano-Optics and Near-Field Optical Microscopy», ARTECH HOUSE, Norwood, 2009.
4. Л. Новотный, Б. Хехт, «Основы нанооптики», Издательство ФИЗМАТЛИТ, Москва, Россия, 2009.

##### Дополнительная литература

1. Шен И.Р. «Нелинейная оптика», Издательство Наука, Москва, 1989.
2. A. Zayats, D.Richards, «Nano-Optics and Near-Field Optical Microscopy», ARTECH HOUSE, Norwood, 2009.
3. Мандель Л., Вольф Э. «Оптическая когерентность и квантовая оптика». Издательство ФИЗМАТЛИТ, Москва, Россия, 2000.
4. Борн М., Вольф Э. «Основы оптики». Издательство, ФИЗМАТЛИТ, Москва. Россия, 2003.
5. L. Solymar, E. Shamonina, “Waves in Metamaterials”, Oxford University Press, Oxford, UK, 2009.

##### Периодическая литература

1. Журнал «Успехи физических наук»
2. Журнал Nature/Methods: <http://www.nature.com/nmeth/index.html>
3. Журнал Nature/Photonics: <http://www.nature.com/nphoton/index.html>
4. Журнал Nature/Nanotechnology: <http://www.nature.com/nnano/index.html>

5. Журнал Nature/Materials: <http://www.nature.com/nmat/index.html>

Интернет-ресурсы.

1. <http://microscopyu.com>
2. <http://nano.msu.ru>
3. <http://nanohub.org/>
4. <http://shoutovaoa.ru>

Материально-техническое обеспечение

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

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