

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау  
А.В. Рогачев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Методы физической и квантовой оптики
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра квантовой радиофизики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

- лекции: 0 час.
- семинары: 60 час.
- лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: В.С. Кривобок, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры квантовой радиофизики 17.04.2023

## Аннотация

Дисциплина предназначена для студентов, прослушавших курс общей физики и имеющих базовые знания в области физической оптики и квантовой механики. Программа курса включает следующие основные разделы: Фурье спектроскопия, низкотемпературная люминесценция, спектроскопия рассеяния света, модуляционная спектроскопия, методы pump-probe (возбуждение-зондирование), конфокальный микроскоп, лазерный пинцет (оптическая ловушка), лазерное охлаждение. В результате овладения дисциплиной обучающийся получит базовые знания, касающиеся современных методик оптического эксперимента, ознакомится с актуальными задачами современной оптики и спектроскопии, а также получит навыки выступлений на научных семинарах.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Целью данного курса является обучение студентов современным экспериментальным методам исследования оптических и спектральных свойств различных систем, а также ознакомление студентов с основными проблемами, стоящими перед современной оптикой, спектроскопией, лазерной физикой и физикой взаимодействия излучения с веществом.

### Задачи дисциплины

- Изучение основных современных методик оптического эксперимента.
- Рассмотрение особенностей конкретных методик, их преимуществ и ограничений.
- Обзор актуальных задач современной оптики и спектроскопии.
- Формирование у студентов навыков выступления на научных семинарах.
- Расширение кругозора студентов.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели

новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- Основные направления передовых исследований в области нелинейной и квантовой оптики, лазерной физики, спектроскопии конденсированного состояния, нанооптики и физике взаимодействия электромагнитного излучения с веществом;
- преимущества и недостатки экспериментальных методик, применяемых в современных оптических исследованиях;
- принципы функционирования основных типов установок, использующихся для выполнения оптических измерений.

уметь:

- Выбирать экспериментальные методики, наиболее подходящие для выполнения требуемых измерений;
- ориентироваться в перспективных направлениях современных оптических исследований;
- быстро осваивать новые методики.

владеть:

- теоретическими основами основных методов проведения оптических измерений.

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

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Фурье спектроскопия.		7		3
2	Низкотемпературная люминесценция.		7		4
3	Спектроскопия рассеяния света.		8		4
4	Модуляционная спектроскопия.		8		4
5	Методы rump-probe (возбуждение-зондирование).		7		3
6	Конфокальный микроскоп.		7		4
7	Лазерный пинцет (оптическая ловушка).		8		4

8	Лазерное охлаждение.		8		4
Итого часов			60		30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

## 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

### Семестр: 1 (Осенний)

#### 1. Фурье спектроскопия.

Принцип работы и преимущества Фурье спектрометра. Примеры применения: Спектры пропускания и отражения кристаллов в области остаточных лучей, фононные поляритоны, исследование локальных колебаний, связанных с дефектами кристаллической решетки, определение энергетической щели в спектре сверхпроводника.

#### 2. Низкотемпературная люминесценция.

Спектры стационарной фотолюминесценции и спектры люминесценции с временным разрешением. Исследование быстропротекающих процессов: время-коррелированный счет фотонов, стрип-камера, оптическое стробирование. Спектроскопия возбуждения фотолюминесценции. Катоодолюминесценция и электролюминесценция. Примеры применения: спектры излучения полупроводниковых наноструктур, дефекты в кристаллах, определение скорости релаксации носителей в полупроводниках.

#### 3. Спектроскопия рассеяния света.

Экспериментальное измерение спектров комбинационного рассеяния света. Экспериментальное измерение спектров Бриллюэновского рассеяния. Резонансное комбинационное рассеяние света. Примеры применения.

#### 4. Модуляционная спектроскопия.

Частотно-модулированное отражение и термоотражение. Пьезоотражение. Электроотражение (эффект Франца-Келдыша). Фотоотражение. Спектроскопия разностного отражения. Примеры применения: определение энергии критических точек на дисперсионных кривых, бесконтактное определение концентрации свободных носителей заряда в полупроводниках.

### Семестр: 2 (Весенний)

#### 5. Методы pump-probe (возбуждение-зондирование).

Исследование электронной подсистемы. Измерение временной зависимости пропускания и отражения. Примеры использования: процессы релаксации и фазовые переходы в электронной подсистеме. Методы исследования колебательной подсистемы. Примеры использования: исследование терагерцовых фононов в наноструктурах, детектирование поверхностных колебаний.

#### 6. Конфокальный микроскоп.

Принцип работы. Использование нелинейных эффектов: преодоление дифракционного предела. Примеры применения: исследование статистики испущенных фотонов, измерение двухфотонных корреляций, прямое наблюдение экситон-плазмонного взаимодействия.

#### 7. Лазерный пинцет (оптическая ловушка).

Градиентная сила. Мультиплексные лазерные пинцеты. Лазерные пинцеты, основанные на оптических волокнах. Лазерные пинцеты, основанные на затухающих полях. Измерение оптических сил.

#### 8. Лазерное охлаждение.

Доплеровское охлаждение. Сизифово охлаждение. Охлаждение методом боковой полосы. Селективное по скоростям когерентное пленение заселённости. Антистоксовое неупругое рассеяние света. Зеемановское замедление. Коллективные эффекты, наблюдаемые в облаках ультрахолодных атомов.

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, доска, медиапроектор, экран.

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Основы физики полупроводников [Текст]/Ю. П. Кардона, -М., Физматлит, 2002
2. D. A. Bonnell, D. N. Basov, M. Bode, U. Diebold, S. V. Kalinin, V. Madhavan, L. Novotny, M. Salmeron, U. D. Schwarz, and P. S. Weiss. Imaging physical phenomena with local probes: From electrons to photons. Rev. Mod. Phys. 84, 1343 (2012)
3. F. J. García de Abajo. Optical excitations in electron microscopy. Rev. Mod. Phys. 82, 209 (2010)
4. В.М. Агранович, Ю.Н. Гартштейн. Пространственная дисперсия и отрицательное преломление света. 176, 1051 (2006)
5. C. E. Wieman, D. E. Pritchard, and D. J. Wineland. Atom cooling, trapping, and quantum manipulation. Rev. Mod. Phys. 71, 253 (1999)
6. R. Ulbricht, E. Hendry, J. Shan, T. F. Heinz, and M. Bonn. Carrier dynamics in semiconductors studied with time-resolved terahertz spectroscopy. Rev. Mod. Phys. 83, 543 (2011)
7. S. M. Block, Making light work with optical tweezers, Nature 360, 493 (1992)

#### Дополнительная литература

1. Физическая оптика [Текст] : учебник для вузов / С. А. Ахманов, С. Ю. Никитин .— М : Изд-во МГУ, 2004 .— 656 с.
2. S.P. Davis, M.C. Abrams and J.W. Brault, Fourier Transform Spectrometry, Academic Press, 2001
3. D. R. Viji, Handbook of Applied Solid State Spectroscopy, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
4. P. R. Griffiths, J. A. De Haseth, Fourier Transform Infrared Spectrometry, 2nd ed., Wiley, 2007
5. C. F. Klingshirn, Semiconductor Optics, Springer Berlin Heidelberg 2012
6. A. Myers Kelley, Condensed-Phase Molecular Spectroscopy and Photophysics, Wiley, 2012
7. A. Diaspro, Confocal and Two-Phase Microscopy: Foundations, Applications, and Advances, Wiley, 2001

### 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Не используются

### 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как Matlab, Matematica.

### 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента в соответствии с данными в рабочей программе. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях;
- при необходимости подготовку к практическим занятиям, коллоквиумам.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору или преподавателю, ведущему практические занятия.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра квантовой радиофизики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчик:** В.С. Кривобок, канд. физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Методы физической и квантовой оптики» обучающийся должен:

**знать:**



- Основные направления передовых исследований в области нелинейной и квантовой оптики, лазерной физики, спектроскопии конденсированного состояния, нанооптики и физике взаимодействия электромагнитного излучения с веществом;
- преимущества и недостатки экспериментальных методик, применяемых в современных оптических исследованиях;
- принципы функционирования основных типов установок, используемых для выполнения оптических измерений.

**уметь:**

- Выбирать экспериментальные методики, наиболее подходящие для выполнения требуемых измерений;
- ориентироваться в перспективных направлениях современных оптических исследований;
- быстро осваивать новые методики.

**владеть:**

- теоретическими основами основных методов проведения оптических измерений.

### **3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлого занятия.

### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Вопросы на 9 семестр:

1. Принцип работы и преимущества Фурье спектрометра.
2. Примеры применения: Спектры пропускания и отражения кристаллов в области остаточных лучей.
3. Спектры стационарной фотолюминесценции и спектры люминесценции с временным разрешением.
4. Исследование быстропротекающих процессов: время-коррелированный счет фотонов, стрик-камера, оптическое стробирование.
5. Спектроскопия возбуждения фотолюминесценции.
6. Католюминесценция и электролюминесценция.
7. Примеры применения: спектры излучения полупроводниковых наноструктур, дефекты в кристаллах, определение скорости релаксации носителей в полупроводниках.
8. Экспериментальное измерение спектров комбинационного рассеяния света.
9. Экспериментальное измерение спектров Бриллюэновского рассеяния.
10. Резонансное комбинационное рассеяние света. Примеры применения.
11. Частотно-модулированное отражение и термоотражение.
12. Пьезоотражение.
13. Электроотражение (эффект Франца-Келдыша).
14. Фотоотражение.
15. Спектроскопия разностного отражения.
16. Примеры применения: определение энергии критических точек на дисперсионных кривых, бесконтактное определение концентрации свободных носителей заряда в полупроводниках.

Вопросы на 10 семестр:

1. Исследование электронной подсистемы.
2. Измерение временной зависимости пропускания и отражения.
3. Примеры использования: процессы релаксации и фазовые переходы в электронной подсистеме.
4. Методы исследования колебательной подсистемы.
5. Примеры использования: исследование терагерцовых фононов в наноструктурах, детектирование поверхностных колебаний.

6. Принцип работы. Использование нелинейных эффектов: преодоление дифракционного предела.
7. Примеры применения: исследование статистики испущенных фотонов, измерение двухфотонных корреляций, прямое наблюдение экситон-плазмонного взаимодействия.
8. Градиентная сила.
9. Мультиплексные лазерные пинцеты.
10. Лазерные пинцеты, основанные на оптических волокнах.
11. Лазерные пинцеты, основанные на затухающих полях.
12. Измерение оптических сил.
13. Доплеровское охлаждение. Сизифово охлаждение.
14. Охлаждение методом боковой полосы.
15. Селективное по скоростям когерентное пленение заселённостей.
16. Антистоксовое неупругое рассеяние света.

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

#### **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Дифференцированный зачет проводится по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. Обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.