



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИАиЭ СО РАН)

УТВЕРЖДЕНА

приказом директора ИАиЭ СО РАН  
от 23.05.2024 № 241

Рабочая программа раздела  
**«ПРОДВИНУТЫЙ КУРС КВАНТОВОЙ ОПТИКИ»**  
дисциплины «ОПТИКА»

Научная специальность: 1.3.6. Оптика  
Форма обучения: очная

№	Вид деятельности	Семестр
		4
1	Лекции, час.	18
2	Практические занятия (семинары), час.	26
3	Самостоятельная работа, час.	100
4	Всего зачетных единиц	4

Форма аттестации – дифференцированный зачет

Новосибирск – 2024

## **1. Аннотация к рабочей программе дисциплины**

Целью подготовки по дисциплине «Оптика», раздел «Продвинутый курс квантовой оптики» программы аспирантуры по научной специальности 1.3.6 Оптика, является овладение основными понятиями, теоретическими моделями, методами и базовыми экспериментальными результатами квантовой оптики и знакомство с современным состоянием данной области науки.

Задачи раздела дисциплины:

- углубленное изучение теоретических вопросов квантовой оптики;
- развитие практических навыков решения задач и чтения оригинальной журнальной литературы в области квантовой оптики, применения квантово-оптических методов в системах анализа вещества, передачи и обработки информации, в технологических и измерительных оптических системах;
- формирование у аспирантов представления о современных фундаментальных и прикладных проблемах квантовой оптики, её связи с лазерной физикой, проблемах приложения квантово-оптических методов исследования в науке и технике;
  - формирование у аспирантов представления о теоретических основах квантово-оптических методов обработки информации (квантовые вычисления и квантовая коммуникация), об основных идеях и достижениях в этой области.

Преподавание раздела дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия (семинары), самостоятельная работа.

Общая трудоемкость составляет 4 зачетных единицы, (144 часа).

## **2. Место дисциплины в образовательной программе**

Рабочая программа раздела «Продвинутый курс квантовой оптики» программы аспирантуры по научной специальности 1.3.6 Оптика относится к образовательному компоненту и направлена на подготовку к сдаче кандидатского экзамена, является обязательной для освоения обучающимися в 4 семестре (третий год обучения в аспирантуре). Раздел «Продвинутый курс квантовой оптики» является базовым для выполнения научно-исследовательской деятельности и подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

## **3. Образовательные технологии**

Технология процесса обучения аспирантов включает в себя следующие образовательные мероприятия:

- аудиторные занятия (лекции);

- практические занятия (семинары);
- самостоятельная работа аспирантов.

В процессе изучения дисциплины, как лектором, так и обучающимися используется метод проблемного изложения материала, самостоятельное чтение аспирантами учебной, учебно-методической и справочной литературы, анализ информационных ресурсов в научных библиотеках и сети Internet по актуальным проблемам и последующие свободные дискуссии по освоенному ими материалу.

Аудиторные занятия проводятся с использованием информационно-телекоммуникационных технологий: учебный материал представлен также в виде мультимедийных презентаций. Презентации позволяют четко структурировать материал занятия.

Самостоятельная работа организована в соответствии с технологией проблемного обучения и предполагает следующие формы активности:

- поиск научной информации в открытых источниках с целью ее анализа и выявления ключевых особенностей исследуемых явлений;
- самостоятельная проработка учебно-проблемных задач, выполняемая с привлечением основной и дополнительной литературы;
- решение проблемных задач стимулируют познавательную деятельность и научно-исследовательскую активность аспирантов.

#### **4. Требования к результатам освоения дисциплины**

В результате изучения раздела «Продвинутый курс квантовой оптики» программы аспирантуры по научной специальности 1.3.6 Оптика и в соответствии с программой кандидатского экзамена аспирант должен:

*знать:*

- теоретические основы, базовые понятия и модели квантовой оптики;
- основы базовых и перспективных технологий и экспериментов в квантовой оптике;
- основные физические процессы, связанные с инженерией (приготовлением и контролем) квантово-оптических состояний;
- принципы работы основных квантово-оптических устройств и систем.

*уметь*

- проводить расчёты квантовых оптических систем на основе аппарата когерентных состояний,
- объяснить природу многофотонной интерференции на принципах, сходных с однофотонной интерференцией;
- преобразовывать друг в друга распределения Глаубера, Вигнера и Хушими для оптических квантовых состояний.

*владеть:*

- понятием квантового кинетического уравнения для моды поля, его выводом и решением;
- понятием сжатого состояния, схемой его получения, обнаружения и применения;
- содержанием основных алгоритмов квантовых вычислений;
- основными идеями получения квантовых изображений на основе коррелированных фотонных пар;
- понятием фазы в квантовой оптике и пониманием причин многообразия подходов к этой проблеме;
- понятием топологической фазы, и её основными типами в оптике.

### **5. Структура и содержание раздела учебной дисциплины**

Раздел, тема занятия		Виды аудиторных занятий (час.)		
		Лекции	Семинары	Итого
Семестр 3		<b>18</b>	<b>26</b>	<b>44</b>
1.	<i>Элементы классической стохастической оптики</i>	2	4	6
2.	<i>Квантованное поле в оптике</i>	2	2	4
3.	<i>Диссипация и необратимость в квантовой оптике</i>	2	2	4
4.	<i>Двухуровневый атом в квантованном поле</i>	2	4	6
5.	<i>Сжатые состояния</i>	2	4	6
6.	<i>Физика оптических квантовых усилителей и аттенюаторов</i>	2	4	6
7.	<i>Обработка информации в квантовой оптике</i>	2	2	4
8.	<i>Слабые измерения</i>	2	2	4
9.	<i>Фаза в квантовой оптике. Геометрическая (топологическая) фаза в оптике</i>	2	2	4

Вопросы для самостоятельного изучения:

*Раздел 1. Элементы классической стохастической оптики*

1. Изучить подход Пэйджа-Лампарда к понятию нестационарного спектра и сравнить его с подходом Винера-Хинчина.
2. Изучить подход Эберли и Водкевича к понятию нестационарного спектра и сравнить его с подходами Винера-Хинчина и Пэйджа-Лампарда.

*Раздел 2. Квантованное поле в оптике*

1. Изучит определения W-распределения Вигнера и Q-распределения Хушими и их связь с P-распределением Глаубера. Найти эти распределения для когерентного состояния и равновесного одномодового состояния.
2. Изучить явление интерференции Хонга-Оу-Манделя.

*Раздел 3. Диссипация и необратимость в квантовой оптике*

1. Найти выражение для стационарного состояния моды в диссипативном резонаторе при внешнем классическом источнике в виде монохроматически колеблющегося диполя.
2. Изучить понятие полной положительности преобразований и его важность в консервативной и (особенно) диссипативной квантовой физике и оптике.

*Раздел 4. Двухуровневый атом в квантованном поле*

1. Изучить модификацию резонансной флуоресценции двухуровневого атома при взаимодействии с полем, находящемся в состоянии Юрке-Столера, восстанавливаемом действием цепи обратной связи.
2. Самостоятельно изучить модель Тависа-Каммингса.

*Раздел 5. Сжатые состояния*

1. Найти стационарное состояние квантованной моды поля при совместном действии двухфотонного источника и ухода фотонов из резонатора.
2. Рассчитать отношение «сигнал-шум» при интерферометрическом измерении фазового сдвига в случае использования когерентного состояния и в случае использования сжатого состояния.
3. Изучить пути использования сжатых состояний в квантовых линиях связи.

*Раздел 6. Физика оптических квантовых усилителей и аттенюаторов*

1. Рассчитать спектр координаты и спектр импульса квантового затухающего осциллятора.
2. Рассмотреть перспективы использования модели осциллятора Бейтмана в квантовой оптомеханике.

### *Раздел 7. Обработка информации в квантовой оптике*

1. Изучить способ реализации операции C-NOT путём возбуждения ридберговских состояний в атомарных кубитах на основе сверхтонких подуровней основного состояния.

2. Рассчитать дисперсии параметров Стокса в квантовой эллипсометрии.

### *Раздел 8. Слабые измерения*

1. Вычислить «слабое значение» наблюдаемой импульса для состояний  $\Psi_1(x) = (1/\pi\Delta)^{1/4}\exp[-x^2/\Delta]$  и  $\Psi_2(x) = (1/\pi\Delta)^{1/4}\exp[-(x-a)^2/\Delta]$ .

2. Рассчитать зависимость от угла падения оптического эффекта Холла.

### *Раздел 9. Геометрическая (топологическая) фаза в оптике*

1. Изучить проявление фазы Рытова-Владимирского в волоконной оптике.

2. Рассмотреть проявления топологической фазы квантованной моды поля, адиабатически подчинённой медленной оптомеханической системе при циклической эволюции параметров гамильтониана (положение равновесия и коэффициент упругости) последней.

## **6. Литература**

### *Основная литература*

1. Ильичёв Л.В. Основы квантовой оптики (электронный курс лекций). НГУ, 2013.
2. Килин С.Я. Квантовая оптика (поля и их детектирование). Минск: Навука і Тэхніка, 1990.
3. Гардинер К.В. Стохастические методы в естественных науках. М.: Мир, 1986.
4. Аллен Л., Эберли Дж. Оптический резонанс и двухуровневые атомы. М.: Мир, 1978.
5. Шляйх В.П. Квантовая оптика в фазовом пространстве. М.: Физматлит, 2005.
6. Оптика наноструктур (под ред. А.В. Фёдорова), С.-Петербург, «Недра», 2005.
7. Дж. Прескилл Квантовая информация и квантовые вычисления. Том 1, 2. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008.
8. Д. Бауместер, А. Экерт, А. Цайлингер Физика квантовой информации М.; Постмаркет, 2002.
9. Менский М.Б. Квантовые измерения и декогеренция. М.: Физматлит, 2001

10. Холево А.С. Введение в квантовую теорию информации. М.:МЦНМО, 2002
11. Имре Ш., Балаж Ф. Квантовые вычисления и связь. М.: Физматлит, 2008
12. M.Kolobov (ed.) Quantum Imaging, Springer, 2007; перевод: КолобовМ.И. (ред.) Квантовое изображение, М.: Физматлит 2009.—328 с.

*Дополнительная литература*

1. Кадомцев Б.Б. Динамика и информация. Редакция журнала «Успехи физических наук», Москва, 1997.
2. G. Benenty, G. Casati, G. Strini Principles of Quantum Computation and Information. World Scientific, 2004.
3. Mathematics of Quantum Computation. G. Chen and R.K. Brylinski (eds.) Chapman&Hall/CRC, 2002.
4. C.W. Gardiner, P. Zoler Quantum Noise. Springer, 2000.
5. Y. Yamamoto, A. Imamoglu Mesoscopic Quantum Optics. John Willey & Sons, Inc., 1999.
6. V. Vedral Modern Foundations of Quantum Optics. Imperial College Press, 2005.
7. H.-A. Bachor and T.C. Ralph A Guide to Experiments in Quantum Optics. WILEY-VCH Verlag, 2004.
8. S. Haroche, J.-M. Raimond Exploring the Quantum. Oxford University Press, 2006.

**7. Электронные энциклопедические издания свободного доступа**

1. Электронный справочник по «Оптике когерентного излучения»  
<http://optics.sinp.msu.ru/co/toc.html>
2. Ресурсы Энциклопедия фотоники: <https://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>