

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»  
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет  
Кафедра квантовой оптики**



УТВЕРЖДАЮ  
Декан ФФ, д.ф.-м.н  
В.Е.Блинов  
2022 г.

**Рабочая программа дисциплины  
ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В КВАНТОВОЙ ОПТИКЕ**

направление подготовки: **03.04.02 Физика**  
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения  
**Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Итоговая аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к итоговой аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	72	32			38				2	
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 34 часа										
Компетенции ПК-1										

Руководитель программы  
д.ф.-м.н.

И.Б. Логашенко

**Новосибирск, 2022**

## Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. ....	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	3
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу. ....	3
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий. ....	4
5. Перечень учебной литературы. ....	6
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. ....	6
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. ....	6
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. ....	7
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. ....	7
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и итоговой аттестации по дисциплине. ....	7

## 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «Обратная связь в квантовой оптике» имеет своей целью овладение основными понятиями, моделями, теоретическими и экспериментальными методами квантовой теории управления.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующих профессиональных Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<b>ПК-1</b> Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	<b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. <b>ПК 1.2</b> Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	<b>Знать</b> основы классической теории управления, основные принципы организации систем квантовой обратной связи. <b>Уметь</b> объяснить физический смысл квантовых стратегий управления в приложениях к системам квантовой оптики. <b>Владеть</b> аппаратом квантовой теории измерений, понятиями когерентной обратной связи, обратной связи, основанной на измерениях, гибридных систем.

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Обратная связь в квантовой оптике» реализуется в весеннем семестре 1-го курса для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является факультативной дисциплиной, реализуемых кафедрой квантовой оптики. Изложение материала опирается на знание студентами основ квантовой механики и статистической физики, основ математического анализа и линейной алгебры. Рекомендуется также знание материала курса лекций «Основы квантовой оптики».

Курс, в первую очередь, предназначен для магистрантов, область будущей профессиональной деятельности которых включает:

- научные исследования с использованием методов квантовой оптики;
- исследования применений методов теории управления к квантовым системам;

## 3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, самостоятельная работа студента, дифференцированный зачёт.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:  
Промежуточная аттестация: дифференцированный зачет.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы/72 академических часа:

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 38 часов;
- итоговая аттестация (дифференцированный зачёт) – 2 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, дифференцированный зачёт) составляет 34 часа.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Итоговая аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к итоговой аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	72	32			38				2	
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 34 часа										
Компетенции ПК-1										

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

Дисциплина «Обратная связь в квантовой оптике» представляет собой полугодовой курс, читаемый во втором семестре магистратуры физического факультета НГУ. Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Введение в классическую теорию обратной связи.	1	8	4		4	
2	Обратная связь в задаче получения сжатых состояний света.	2	10	4		6	
3	Общая теория различения квантовых состояний.	3	8	4		4	
4	Субоптимальные методы различения когерентных состояний Глаубера.	4	8	4		4	
5.	Управление состоянием одиночного кубита.	5	8	4		4	
6.	Обратная связь в оптомеханике.	6	8	4		4	

7.	Применения обратной связи для управления декогеренцией квантовых состояний.	7	8	4		4	
8.	Обратная связь в гибридных системах.	8	6	2		4	
9.	Обратная связь на основе переключений фазы.	9	6	2		4	
10.	Дифференцированный зачёт		2				2
<b>Всего</b>			<b>72</b>	<b>32</b>		<b>38</b>	<b>2</b>

### Программа и основное содержание лекций (32 часа)

#### Раздел 1. Введение в классическую теорию обратной связи (4 часа)

Цели и задачи курса, его общая структура. Определение динамических систем, примеры. Понятие обратной связи. Передаточная функция. Пропорциональное, интегральное и дифференциальное управление. Учет шумов и задержек. Устойчивость управления.

#### Раздел 2. Обратная связь в задаче получения сжатых состояний света (4 часа)

Сжатые состояния света – определение, методы детектирования. Квантовые уравнения Ланжевена и формализм input-output. Оптический параметрический осциллятор. Понятие когерентной обратной связи. Применение обратной связи для усиления сжатия оптического излучения.

#### Раздел 3. Общая теория различения квантовых состояний (4 часа)

Квантовая теория измерений фон Неймана. Вполне положительные преобразования. Квантовые операции, обобщенные измерения. Постановка задачи различения двух неортогональных квантовых состояний. Граница Хельстрёма.

#### Раздел 4. Субоптимальные методы различения когерентных состояний Глаубера (4 часа)

Практическая реализация различения когерентных состояний Глаубера на основе фотодетектирования. Адаптивное фотодетектирование. Формулировка задачи на языке теории оптимального управления. Сравнение различных субоптимальных алгоритмов.

#### Раздел 5. Управление состоянием одиночного кубита (4 часа)

Описание состояний двухуровневой системы, сфера Блоха. Постановка задачи коррекции квантового состояния в присутствии дефазировки. Понятие обратной связи, основанной на измерениях. Квантовые стратегии на основе различных «распутываний» операции дефазировки. Сравнение точности коррекции с классическими стратегиями, доказательство оптимальности (идея). Экспериментальная реализация на примере поляризационных состояний света.

#### Раздел 6. Обратная связь в оптомеханике (4 часа)

Общий вид оптомеханических систем. Уравнения движения для поля в резонаторе. Оптическая и механическая восприимчивость. Оптомеханическое взаимодействие. Эффект оптической пружины, интерпретация на основе теории обратной связи. Принцип оптического охлаждения – теория, ключевые эксперименты.

#### Раздел 7. Применения обратной связи для управления декогеренцией квантовых состояний (4 часа)

Понятие декогеренции квантовых систем. Рамзеевская интерферометрия. Приготовление фоковских состояний света – теория, эксперимент.

#### Раздел 8. Обратная связь в гибридных системах (2 часа)

Понятие гибридных квантово-классических систем. Гибридная плотность. Описание измерений над гибридными системами. Вывод управляющего уравнения. Задача об управлении бозе-конденсатом в двухъямном потенциале.

## Раздел 9. Обратная связь на основе переключений фазы (2 часа)

Квантованная мода в оптическом резонаторе. Переключения фазы источника поля на основе фотодетектирования испущенных фотонов. Р-функция стационарного состояния поля. Состояния Юрке-Столера. Управление декогеренцией состояний Юрке-Столера при помощи обратной связи, основанной на измерениях.

### Самостоятельная работа студентов (38 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к занятиям, изучение лекций	20
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	18

### 5. Перечень учебной литературы.

1. С.В. Емельянов и др., Математические методы теории управления: проблемы устойчивости, управляемости и наблюдаемости, Москва, Физматлит, 2013. (2 экз.)
2. В.А. Бесекерский, Е.П. Попов, Теория систем автоматического управления, Санкт-Петербург, Профессия, 2003. (1 экз.)

### 6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

1. J. Bechhoefer, Feedback for physicists: A tutorial essay on control, Review of Modern Physics, v.77, 783, 2005.
2. Н.-М. Wiseman, G.J. Milburn, Quantum Measurement and Control, Cambridge, Cambridge University Press, 2010.
3. K. Jacobs, Quantum Measurement Theory and its Applications, Cambridge, Cambridge University Press, 2014.
4. M.A. Nielsen, I.L. Chuang, Quantum Computation and Quantum Information, Cambridge, Cambridge University Press, 2011.
5. Doherty et al., Quantum feedback control and classical control theory, PRA, v.62, 012105, 2000.
6. R.L. Cook et al., Optical coherent state discrimination using a closed-loop quantum measurement, Nature, v.446, 774, 2007.
7. Agata M. Branczyk et al., Quantum control of a single cubit, PRA v.75, 012329 (2007).
8. M. Aspelmeyer et al., Cavity Optomechanics, Rev. Mod. Phys, v.86, 1391, 2014.
9. Jajos Diosi, Hybrid Quantum-Classical Master Equations, arXiv: 1207.3203v3, 2013.
10. S. Iida et al., Experimental demonstration of coherent feedback control on optical field squeezing, arXiv: 1103.1324v2, 2012.
11. C. Sayrin et al., Real-time quantum feedback prepares and stabilizes photon number states, Nature 477, v.73, 2011.
12. Д.Б. Хорошко, С.Я. Килин, Резонансная флуоресценция, возбуждаемая макроскопической суперпозицией в цепи обратной связи, ЖЭТФ, т.117, 844 (2000).
13. Alan C. Santos Quantum Information Processing via Hamiltonian Inverse Quantum Engineering, arXiv:1804.08493, 2018

### 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);

- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

### **7.1 Современные профессиональные базы данных**

Не используются.

### **7.2. Информационные справочные системы**

Не используются.

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Для реализации дисциплины «Обратная связь в квантовой оптике» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, итоговой и итоговой аттестации.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и итоговой аттестации по дисциплине.**

### **10.1 Порядок проведения текущего контроля и итоговой аттестации по дисциплине**

#### ***Промежуточная аттестация***

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области структуры атомных спектров в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на зачёте. Зачёт проводится в конце семестра билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня.

## Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
<b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	<b>Знать</b> основы классической теории управления, основные принципы организации систем квантовой обратной связи.	Опрос в начале каждой лекции, дифференцированный зачет.
<b>ПК 1.2</b> Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	<b>Уметь</b> объяснить физический смысл квантовых стратегий управления в приложениях к системам квантовой оптики. <b>Владеть</b> аппаратом квантовой теории измерений, понятиями когерентной обратной связи, обратной связи, основанной на измерениях, гибридных систем.	Опрос в начале каждой лекции, дифференцированный зачет.

### 10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Обратная связь в квантовой оптике».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (не зачтено)	Пороговый уровень (зачтено)	Базовый уровень (зачтено)	Продвинутый уровень (зачтено)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать	Продemonстрированы частично основные умения.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задания с	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные



		стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	негрубыми ошибками или с недочетами.	задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.2	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

### 10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

#### Билеты на дифференцированный зачет

##### Билет 1

1. Понятие динамических систем. Пример на основе гармонического осциллятора с трением.
2. Вывод квантового уравнения Ланжевена.

##### Билет 2

1. Интегральное и пропорциональное управление в классических системах – описание, сравнение эффективности.
2. Описание квантовых измерений по фон Нейману. Селективные и неселективные измерения.

##### Билет 3

1. Вполне положительные преобразования квантовых состояний. Представление операторных сумм.
2. Классические динамические системы – управление в присутствии внешних шумов и задержек. Устойчивость к возмущениям.

##### Билет 4

1. Задача о различии двух неортогональных квантовых состояний. Граница Хельстрёма.
2. Оптический параметрический осциллятор. Идея когерентной обратной связи.

##### Билет 5

1. Сфера Блоха. Принцип коррекции квантового состояний двухуровневой системы в присутствии дефазировки, точность коррекции.
2. Различение когерентных состояний Глаубера. Адаптивное фотодетектирование. Наводящие соображения к выводу оптимального управления, его физический смысл.

##### Билет 6

1. Понятие обратной связи, основанной на измерениях. Примеры – обратная связь на основе переключений фазы.
2. Квантовое уравнение Ланжевена для поля в резонаторе. Оптомеханические уравнения движения.

##### Билет 7

1. Эффекты отдачи в оптомеханических системах. Эффект охлаждения механической подсистемы – интерпретация на основе действия обратной связи.

2. Декогеренция квантовых состояний – пример неклассического поля в неидеальном резонаторе.

### **Билет 8**

1. Идея приготовления фоковских состояний света – рамзеевская интерферометрия, дисперсионное взаимодействие.
2. Гибридные системы – гибридная плотность, вывод управляющего уравнения.

### **Билет 9**

1. Состояния Юрке-Столера в открытом резонаторе, их стабилизация с использованием обратной связи, основанной на измерениях.
2. Управление бозе-конденсатом невзаимодействующих атомов в двухъямном потенциале при помощи оптического зондирования – описание в двухмодовом приближении.

**Форма билета на зачёт представлена на рисунке**

<b>МИНОБРНАУКИ РОССИИ</b>	
<i>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)</i>	
<b>Физический факультет</b>	
<b>БИЛЕТ № _____</b>	
1. ....	
2. ....	
Составитель _____ /Ф.И.О. преподавателя/ (подпись)	
« ____ » _____ 20 ____ г.	

Оценочные материалы по итоговой аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы  
по дисциплине «Обратная связь в квантовой оптике»  
по направлению подготовки 03.04.02 Физика  
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного