

**ГОУ ВПО Российско-Армянский (Славянский)
университет**



УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины: Б1.В.ДВ.03.01 Квантовые лаборатории

Автор (ы) к.ф.-м.н., преподаватель Манташян Пайцар Агвановна
Ф.И.О, ученое звание (при наличии), ученая степень (при наличии)

Направление подготовки: 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника
Наименование образовательной программы: Квантовая информатика

Согласовано:

Заведующий Кафедрой общей физики и квантовых наноструктур

Айрапетян Д.Б.



(подпись)

1. АННОТАЦИЯ

1.1. Краткое описание содержания данной дисциплины;

«Лаборатория по квантовой оптике» предназначена для изучения фундаментальных принципов и современных экспериментальных методов, применяемых в области квантовой оптики. Курс предоставляет студентам теоретическую базу и практические навыки, необходимые для исследования взаимодействия света с веществом на квантовом уровне. Основное внимание уделяется изучению таких явлений, как когерентность, интерференция, дифракция, а также уникальных квантовых свойств света, включая однофотонные состояния и квантовую запутанность.

Курс состоит из двух основных частей:

1. Теоретическая подготовка

- Основы когерентного и некогерентного излучения;
- Квантовая природа света и фотонов;
- Взаимодействие света с атомами, молекулами и наноструктурами;
- Применение квантовой оптики в современных технологиях, включая квантовую криптографию и квантовые вычисления.

2. Практическая работа

- Проведение лабораторных экспериментов с использованием лазеров, интерферометров и поляриметров;
- Изучение процессов спонтанного и вынужденного излучения;
- Анализ поляризации света и его воздействия на различные квантовые системы;
- Работа с современным оптическим оборудованием, таким как детекторы фотонов, спектрометры и модуляторы.

Студенты также занимаются исследовательской деятельностью, проводя самостоятельные эксперименты, что позволяет им закрепить полученные знания, развить критическое мышление и получить опыт в постановке научных задач. В результате освоения дисциплины студенты будут готовы к решению прикладных и научных задач в области квантовой оптики, а также к участию в исследованиях, связанных с развитием технологий на базе квантовых явлений.

Курс сочетает фундаментальный подход с практической направленностью, обеспечивая студентов необходимыми навыками для дальнейшего развития в области квантовых технологий и оптической физики.

1.2. Трудоемкость в академических кредитах и часах, формы итогового контроля (экзамен/зачет);

5 академических кредитов / 180 часов. Форма итогового контроля — экзамен.

1.3. Взаимосвязь дисциплины с другими дисциплинами учебного плана специальности (направления)

Физика 3, Введение в квантовую механику, Углубленный курс квантовой механики и Квантовая Информатика.

1.4. Результаты освоения программы дисциплины:

Код компетенции (в соответствии рабочим с учебным планом)	Наименование компетенции (в соответствии рабочим с учебным планом)	Код индикатора достижения компетенций (в соответствии рабочим с учебным планом)	Наименование индикатора достижений компетенций (в соответствии рабочим с учебным планом)
УК-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений	УК-2.1	Знает виды ресурсов и ограничений для решения профессиональных задач и основные методы оценки разных способов решения задач; действующее законодательство и правовые нормы, регулирующие профессиональную деятельность
		УК-2.2	Умеет проводить анализ поставленной цели и формулировать задачи,

		УК-2.3	которые необходимо решить для ее достижения и анализировать альтернативные варианты для достижения намеченных результатов; использовать нормативно-правовую документацию в сфере профессиональной деятельности Владеет методиками разработки цели и задач проекта, методами оценки потребности в ресурсах, продолжительности и стоимости проекта; навыками работы с нормативно-правовой документацией
УК-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде	УК-3.1 УК-3.2	Знает основные приемы и нормы социального взаимодействия и основные понятия и методы конфликтологии, технологии межличностной и групповой коммуникации в деловом взаимодействии Умеет устанавливать и поддерживать контакты, обеспечивающие успешную работу в коллективе; применять основные методы

		УК-3.3	и нормы социального взаимодействия для реализации своей роли и взаимодействия внутри команды Владеет простейшими методами и приемами социального взаимодействия и работы в команде
УК-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни	УК-6.1	Знает основные приемы эффективного управления собственным временем и основные методики самоконтроля, саморазвития и самообразования на протяжении всей жизни
		УК-6.2	Умеет эффективно планировать и контролировать собственное время; использовать методы саморегуляции, саморазвития и самообучения
		УК-6.3	Владеет методами управления собственным временем; технологиями приобретения, использования и обновления социокультурных и профессиональных знаний, умений и навыков; методиками саморазвития и

			самообразования в течение всей жизни
ПК-3	Готов осваивать принципы планирования и методы автоматизации эксперимента на основе информационно-измерительных комплексов как средства повышения точности и снижения затрат на его проведение, овладевать навыками измерений в реальном времени	ПК-3.1 ПК-3.2 ПК-3.3	Знает способы организации и проведения экспериментальных исследований Умеет самостоятельно проводить экспериментальные исследования Владеет навыками проведения исследования с применением современных средств и методов
ПК-4	Способен к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов	ПК-4.1 Ц ПК-4.2 ПК-4.3	Знает способы организации и проведения экспериментальных исследований Умеет самостоятельно проводить экспериментальные исследования Владеет навыками проведения исследования с применением современных средств и методов
ПК-6	Способен анализировать состояние научно-технической проблемы путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников	ПК-6.1 Ц	Знает современные технические требования к выбору конструктивно-технологического базиса изделий микро- и наноэлектроники

		ПК-6.2	Умеет анализировать литературные и патентные источники при разработке изделий микро- и наноэлектроники
		ПК-6.3	Владеет навыками конструирования изделий микро- и наноэлектроники
ПК-7	Готов определять цели, осуществлять постановку задач проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения, подготавливать технические задания на выполнение проектных работ	ПК-7.1	Знает схемы и устройства изделий микро- и наноэлектроники различного функционального назначения
		ПК-7.2	Умеет подготавливать технические задания на выполнение проектных работ
		ПК-7.3	Владеет навыками разработки архитектуры изделий микро- и наноэлектроники
ПК-8	Способен проектировать устройства, приборы и системы электронной техники с учетом заданных требований	ПК-8.1	Знает принципы подготовки технических заданий на современные электронные устройства
		ПК-8.2	Умеет разрабатывать приборы и системы электронной техники
		ПК-8.3	Владеет навыками разработки рабочей топологии и плана технологии монтажа и

			сборки электронной компонентной базы изделий микро- и наноэлектроники
ПК-10	Способен разрабатывать проектно-конструкторскую документацию в соответствии с методическими и нормативными требованиями	ПК-10.1 ПК-10.2 ПК-10.3	Знает нормативные требования к разработке проектно-конструкторской документации Умеет использовать стандарты и нормативные требования при разработке документации Владеет навыками выпуска документации для организации серийного выпуска изделий

2. УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА

2.1. Цели и задачи дисциплины

Цель дисциплины:

Формирование у студентов теоретических знаний и практических навыков в области квантовой оптики, необходимых для проведения научных исследований и решения задач, связанных с изучением квантовых свойств света и его взаимодействия с веществом.

Задачи дисциплины:

1. Ознакомить студентов с фундаментальными принципами квантовой оптики, включая когерентность, интерференцию, дифракцию и квантовые состояния света.
2. Развить умение работать с современным лабораторным оборудованием, включая лазеры, интерферометры, спектрометры и поляриметры.
3. Научить анализировать результаты экспериментов и интерпретировать квантовые эффекты, такие как запутанность, суперпозиция и однофотонные состояния.
4. Сформировать навыки самостоятельного проведения экспериментов, включая постановку задач, выбор методов исследования и обработку данных.

5. Развить умение применять квантовую оптику в решении прикладных задач, включая квантовую криптографию и метрологию.
6. Подготовить студентов к участию в научных проектах и разработке новых технологий на основе квантовых эффектов.

Курс направлен на комплексное освоение теории и практики квантовой оптики, что обеспечит подготовку студентов к профессиональной и исследовательской деятельности.

2.2. Трудоемкость дисциплины и виды учебной работы (в академических часах и зачетных единицах) *(удалить строки, которые не будут применены в рамках дисциплины)*

Виды учебной работы	Всего, в акад. часах	Распределение по семестрам
		1 сем
1	2	3
1.Общая трудоемкость изучения дисциплины по семестрам, в т. ч.:	180	180
1.1.Аудиторные занятия, в т. ч.:	48	48
1.1.1.Лекции	16	16
1.1.2.Практические занятия, в т. ч.		
1.1.3.Лабораторные работы	32	32
1.2.Самостоятельная работа, в т. ч.:	78	78
1.3. Консультации		
Итоговый контроль (Экзамен, Зачет, диф. зачет - указать)	Экзамен	54

2.3. Содержание дисциплины

2.3.1. Тематический план и трудоемкость аудиторных занятий (модули, разделы дисциплины и виды занятий) по рабочему учебному плану

Разделы и темы дисциплины	Всего (ак. часов)	Лекции (ак. часов)	Лаб. Занятия (ак. часов)
1	2=3+4+5+6 +7	3	4
Тема 1. Основы фотоники и волноводной оптики	12	4	8

Тема 2. Компоненты фотонных интегральных схем	9	3	6
Тема 3. Материалы и технологии изготовления ФИС	9	3	6
Тема 4. Проектирование и моделирование ФИС	9	3	6
Тема 5. Применения и перспективы ФИС	9	3	6
ИТОГО	48	16	32

2.3.2. Краткое содержание разделов дисциплины в виде тематического плана

Тема 1. Введение в квантовые лаборатории

Краткий обзор основных концепций квантовой механики, лежащих в основе экспериментальных установок. Роль эксперимента в проверке и иллюстрации квантовых явлений.

Тема 2. Квантовые состояния и суперпозиция

Определение квантового состояния. Принцип суперпозиции. Простые эксперименты, демонстрирующие интерференцию и поведение одиночных фотонов.

Тема 3. Поляризация света как модель кубита

Изучение линейной, круговой и эллиптической поляризаций. Использование поляризационного кубита в простых квантовых операциях. Основы работы с поляризаторами и анализаторами.

Тема 4. Эксперименты Алисы и Боба: основы квантовой передачи информации

Моделирование передачи кубитов между Алисой и Бобом. Принципы измерения в несовместимых базисах. Иллюстрация неопределённости и необратимости измерения.

Тема 5. Протокол BB84 и основы квантовой криптографии

Экспериментальная реализация одного из первых квантовых криптографических протоколов. Принцип случайного выбора базиса. Роль наблюдателя (Евы) в нарушении корреляций.

Тема 6. Квантовая интерференция и квантовый ластик

Классический опыт с интерференцией на двух щелях. Реализация квантового ластика — удаление "знания" о прохождении через щель восстанавливает интерференционную картину. Иллюстрация принципа дополнительности.

Тема 7. Квантовая запутанность и корреляции

Обзор экспериментов по квантовой запутанности. Теоретические основы и простые демонстрации (световые импульсы, коррелированные поляризации).

Тема 8. Измерения и разрушение квантового состояния

Изучение влияния измерения на систему. Отличие слабого и проективного измерения. Практическая демонстрация необратимости измерения.

Тема 9. Визуализация квантовых процессов

Работа с программами визуализации квантовых состояний (например, Bloch-sphere симуляторы). Представление операций и преобразований на кубитах.

Тема 10. Проектные работы и мини-исследования

Разработка и проведение студентами простых квантовых экспериментов или численного моделирования. Презентация результатов. Обсуждение трудностей и интерпретаций.

2.3.3. Краткое содержание семинарских/практических занятий/лабораторного практикума

Исследование поляризации света и работа с поляризационными фильтрами

- Определение линейной, круговой и эллиптической поляризации.
- Работа с поляризаторами и анализаторами.
- Представление поляризационного состояния на сфере Блоха.

Моделирование квантового бита (кубита) с помощью поляризации фотонов

- Подготовка произвольных квантовых состояний.
- Измерение в различных базисах (H/V, D/A).
- Принцип неопределённости в действиях Алисы и Боба.

Эксперимент по квантовому протоколу BB84 (Алиса и Боб)

- Реализация отправки случайных битов.
- Измерения Боба в разных базисах.
- Сравнение битов и построение итогового ключа.
- Влияние наблюдателя (Евы) на результаты.

Квантовый ластик: наблюдение и стирание "информации" о пути

- Интерференция на двойной щели.
- Идентификация прохождения через щель и разрушение интерференции.
- Удаление «информации» и восстановление интерференционной картины.

Корреляции и квантовая запутанность (демонстрационная установка)

- Изучение предсказаний квантовой механики и классических ожиданий.
- Качественное наблюдение коррелированных состояний.
- Обсуждение парадокса ЭПР.

Влияние измерения на квантовое состояние

- Демонстрация необратимости измерения.
- Изучение различий между сильным и слабым измерением (концептуально).
- Разбор реальных физических ограничений при наблюдении квантовых систем.

Визуализация квантовых состояний и протоколов

- Работа с интерактивными моделями (Bloch Sphere Simulator, Quantum Composer и др.).
- Визуальное представление операций над кубитами.
- Простая симуляция шумов и ошибок передачи.

2.3.4. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Лаборатория для проведения практических занятий

2.4. Модульная структура дисциплины с распределением весов по формам контролей

Формы контролей	Вес формы (форм) текущего контроля в результирующей оценке текущего контроля (по модулям)		Вес формы промежуточного контроля в итоговой оценке промежуточного контроля		Вес итоговой оценки промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей		Вес итоговой оценки промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей (семестровой оценке)	Веса результирующей оценки промежуточных контролей и оценки итогового контроля в результирующей оценке итогового контроля
	M1 ¹	M2	M1	M2	M1	M2		
Вид учебной работы/контроля								
Контрольная работа (при наличии)			0.5	0.5				
Устный опрос (при наличии)								
Лабораторные работы (при наличии)	0.5	0.5						
Письменные домашние задания (при наличии)								
Решение задач	0.5	0.5						
Веса результирующих оценок текущих контролей в итоговых оценках промежуточных контролей					0.5	0.5		
Веса оценок промежуточных контролей в итоговых оценках промежуточных контролей								
Вес итоговой оценки 1-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0.5	
Вес итоговой оценки 2-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0.5	
Вес результирующей оценки промежуточных контролей в результирующей оценке итогового контроля								0.5
Вес итогового контроля (Экзамен/зачет) в результирующей оценке итогового контроля								0.5
	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$

3. Теоретический блок (указываются материалы, необходимые для освоения учебной программы дисциплины)

3.1. Материалы по теоретической части курса

3.1.1. Учебник(и);

Гаручо Д. Квантовая оптика: введение — М.: Мир, 2006

Fox M. Quantum Optics: An Introduction — Oxford University Press, 2006

Zeilinger A. Dance of the Photons: From Einstein to Quantum Teleportation —

Farrar, Straus and Giroux, 2010

¹ Учебный Модуль

4. Фонды оценочных средств (указываются материалы, необходимые для проверки уровня знаний в соответствии с содержанием учебной программы дисциплины).

4.1. Планы практических занятий

- ✓ **Поляризация света как модель квантового состояния**
 - Изучение линейной и круговой поляризации
 - Работа с поляризаторами и анализаторами
 - Визуализация состояний на сфере Блоха
- ✓ **Моделирование кубита с помощью поляризационного фильтра**
 - Подготовка заданного квантового состояния
 - Проведение измерений в разных базисах (H/V, D/A)
 - Анализ вероятностей исходов
- ✓ **Передача квантовой информации: Алиса и Боб**
 - Ролевая модель отправки и измерения поляризованных фотонов
 - Демонстрация принципа несовместимости измерений
 - Анализ совпадений и ошибок
- ✓ **Протокол BB84 и основы квантовой криптографии**
 - Генерация случайных битов и базисов
 - Формирование общего ключа
 - Обнаружение вмешательства "Евы" и анализ ошибок
- ✓ **Квантовый ластик: удаление информации о прохождении**
 - Интерференция при известном и неизвестном пути
 - Исчезновение и восстановление интерференционной картины
 - Понимание принципа дополнительности
- ✓ **Симуляция квантовых операций и состояний**
 - Использование сферы Блоха и квантовых симуляторов (IBM, Quantum Composer)
 - Применение логических вентилей: X, Z, H, измерение
 - Наблюдение изменения состояния в реальном времени
- ✓ **Запутанность: визуализация и интерпретация (опционально)**
 - Демонстрация коррелированных состояний (модельно)
 - Интерпретация квантовых корреляций
 - Обсуждение парадокса ЭПР
- ✓ **Проектное задание: подготовка собственного простого квантового протокола**
 - Командная разработка сценария
 - Демонстрация в классе
 - Анализ результата и обсуждение

4.2. Вопросы и задания для самостоятельной работы студентов

- ✓ Объясните принцип суперпозиции в квантовой механике.
- ✓ Что такое коллапс волновой функции?

- ✓ В чём отличие классической частицы от кубита?
- ✓ Постройте аналогию между монеткой и кубитом.
- ✓ Нарисуйте и поясните сферу Блоха.
- ✓ Изобразите состояния $|0\rangle$, $|1\rangle$, $|+\rangle$, $|-\rangle$ на сфере Блоха.
- ✓ Опишите действие операторов X , Z , H на кубит.
- ✓ Объясните измерение кубита в разных базисах.
- ✓ Опишите виды поляризации света: линейная, круговая, эллиптическая.
- ✓ Как поляризация используется для моделирования кубита?
- ✓ Рассчитайте интенсивность прохождения света через два поляризатора при угле 45° .
- ✓ Составьте таблицу выбора базисов Алисы и Боба в протоколе BB84 (на 20 бит).
- ✓ Опишите процесс формирования общего ключа в BB84.
- ✓ Как можно обнаружить подслушивателя в квантовой криптографии?
- ✓ Почему квантовая криптография считается защищённой?
- ✓ Что такое квантовый ластик и как он работает?
- ✓ Нарисуйте схему эксперимента с квантовым ластиком.
- ✓ Объясните, как наличие или отсутствие информации влияет на интерференционную картину.
- ✓ Смоделируйте простую квантовую схему с гейтами $H \rightarrow X \rightarrow H$.
- ✓ Что происходит при действии гейта Z на состояние $|+\rangle$?
- ✓ Смоделируйте в симуляторе передачу кубита с помехами.
- ✓ Подготовьте мини-проект на тему: «Квантовый протокол передачи зашифрованного сообщения».

4.3. Образцы вариантов контрольных работ, тестов и/или других форм текущих и промежуточных контролей

Вариант 1

Объясните принцип суперпозиции.

Нарисуйте и прокомментируйте сферу Блоха.

Рассчитайте прохождение света через два поляризатора (угол 45°).

Опишите выполнение протокола BB84 на примере 8 бит.

Объясните принцип действия квантового ластика.

Вариант 2

Что такое кубит и как он отличается от классического бита?

Описать действие квантовых гейтов X , H , Z .

Как реализовать кубит с помощью поляризации света?

Составить таблицу базисов Алисы и Боба (BB84, 10 бит).

Как наличие или отсутствие информации влияет на интерференцию в квантовом ластике?

Вариант 3

Объясните коллапс волновой функции.

Нарисуйте схему: $H \rightarrow X \rightarrow H$ и укажите итоговое состояние.

Как определить наличие подслушивателя в BB84?

Рассчитайте вероятность прохождения фотона через поляризаторы с углом 30° .

Чем опыт с квантовым ластиком отличается от классических представлений?

Вариант 4

Дайте определение квантовой запутанности.

Объясните роль гейта Hadamard в квантовых алгоритмах.

Смоделируйте простую схему шифрования с использованием BB84.

Проанализируйте ошибки в ключе (по заданной таблице базисов).

Нарисуйте и прокомментируйте схему квантового ластика.

4.4. Перечень экзаменационных вопросов

1. Понятие суперпозиции и измерения в квантовой механике
2. Определение кубита и его геометрическое представление на сфере Блоха
3. Квантовые гейты: X , Z , H — действие и матричное представление
4. Принцип неопределённости и его роль в квантовых экспериментах
5. Что такое интерференция? Как она проявляется в квантовом эксперименте с одним фотоном?
6. Опыт с поляризаторами: физическая интерпретация и расчёт интенсивности
7. Принципы квантовой криптографии. Основы протокола BB84
8. Сравнение классических и квантовых методов шифрования
9. Квантовый ластик: описание эксперимента и его философское значение
10. Как стирание информации влияет на интерференционную картину?

11. Запутанные состояния: определение, свойства и примеры
12. Обнаружение подслушивателя в протоколе BB84: методика и анализ
13. Роль случайности в квантовой механике и квантовых коммуникациях
14. Фотон как носитель информации: квантовое описание
15. Моделирование квантовых схем: логика, блоки, назначение
16. Роль наблюдателя в квантовой системе: физика и интерпретации
17. Основы квантовой телепортации: схема и принципы
18. Практическое применение квантовой криптографии в современных технологиях
19. Опыт Алисы и Боба: как интерпретировать обмен данными через квантовый канал
20. Перспективы развития квантовых коммуникаций и квантовых лабораторий

4.5. Образцы экзаменационных билетов

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра общей физики и квантовых наноструктур

Направление: Электроника и наноэлектроника
Дисциплина: Фотонные интегральные схемы
(бакалавриат IV-ый курс, II-ой семестр)

Экзаменационный билет № **

1. Квантовые гейты: X , Z , H — действие и матричное представление
2. Обнаружение подслушивателя в протоколе BB84: методика и анализ
3. Основы квантовой телепортации: схема и принципы

Зав. кафедрой ОФКН _____ Д.Б. Айрапетян
20__ г.
