Научная статья
УДК 372.853
ББК 74.489
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 78A10

Педагогическое проектирование дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов в системе управления обучением MOODLE

Е. С. Павлова [1]

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 11 мая 2026 года
После переработки 12 мая 2026 года
Опубликована 30 июня 2026 года

Аннотация. Описан процесс разработки дистанционного курса, охватывающего ключевые аспекты физики метаматериалов. Дистанционный курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов разработан с помощью инструментария системы управления обучением MOODLE. При помощи модульной технологии разработан специализированный дистанционный курс, охватывающий ключевые аспекты физики и технологии наноструктур из квантовых метаматериалов. Дистанционный курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов построен с использованием модульной технологии построения курса, что позволяет эффективно управлять темпом продвижения по курсу по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов и применять смешанную технологию в преподавании физики и технологии квантовых метаматериалов. Теоретические материалы курса систематизировали и актуализировали знания о квантовых метаматериалах. Курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов интегрирован в образовательные платформы педагогического университета и планируется к использованию в образовательных программах бакалавриата и специалитета.

Ключевые слова: курс, дистанционный курс, квантовая оптика, оптика наноструктур, метаматериал, модульная технология, система управления обучением

Введение

Квантовая оптика наноструктур из периодических метаматериалов исследует фундаментальные взаимодействия света с искусственно созданными наноструктурами, демонстрирующими экзотические оптические свойства такие, как отрицательный показатель преломления, гиперболическая дисперсия или топологическая защита мод, ко-

[1] E-mail: kat.pavlova2003@icloud.com

торые невозможно воспроизвести в природных материалах. В квантовой оптике наноструктур ключевую роль играют квантовые эффекты на наномасштабе, включая размерное квантование в полупроводниковых или плазмонных наночастицах, взаимодействие квантовых эмиттеров (например, квантовых точек или излучательных центров) с локализованными плазмонами или микрорезонаторами, а также пустотное расщепление в гибридных системах метаматериал-квантовый источник. Нелинейная оптика метаматериалов в квантовом режиме открывает возможности для создания ультракомпактных устройств — таких как генераторы одиночных фотонов, параметрические усилители или квантовые переключатели, где нелинейные эффекты второго и третьего порядков усиливаются за счёт локализации поля в наноструктурах, снижая требуемую мощность лазерного излучения на несколько порядков. Приложения квантовой оптики наноструктур охватывают квантовые технологии нового поколения: от сверхчувствительных сенсоров на основе плазмонных наноантенн до квантовых компьютеров на фотонных кубитах, а также метаповерхности для управления поляризацией и фазой света в интегральной оптике, что критически важно для развития квантовых сетей и оптической обработки информации. Методологически исследователи сочетают теоретические подходы (квантовая электродинамика, теории эффективных сред, методы решёток) с экспериментальными техниками (ближнепольная оптическая микроскопия, спектроскопия нелинейного рассеяния, квантовая оптическая томография), что делает эту область передовой платформой для междисциплинарных исследований на стыке физики, материаловедения и информационных технологий.

Целью работы является исследование процесса создания дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, обеспечивающего изучение темы с учётом современных научных достижений.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи исследования:

1. разработать модульную структуру и избранные элементы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов в системе управления обучением MOODLE,
2. разработать материалы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов в системе управления обучением MOODLE.

Объектом исследования является курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов. Предметом исследования является описание особенностей разработки модульной структуры и избранных элементов дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов в системе управления обучением MOODLE.

Методами исследования являются компьютерные методы разработки дистанционным курсов в системе управления обучением MOODLE, анализ научной литературы, методы педагогического дизайна для создания тематических модулей дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов. Материалами исследования являются литературные источники по исследованиям метаматериалов, программные платформы для дистанционного обучения.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые выполнена разработка программы курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, объединяющего физические свойства и прикладные аспекты наноструктур из квантовых метаматериалов.

Гипотеза научного исследования заключается в том, что если использовать теоретические модели физических процессов в квантовых точках и результаты численных расчётов физических характеристик квантовых точек в дистанционном курсе по кван-

товой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, то можно создать специализированный дистанционный курс, опирающийся на современные представления о физических свойствах наноструктур из квантовых метаматериалов, который повысит уровень компетенций обучающихся в области физики наноструктур из квантовых метаматериалов и упростит доступ к актуальным знаниям.

Теоретическая значимость исследования заключается в систематизации знаний по физике наноструктур из квантовых метаматериалов, структуризации образовательных материалов для дистанционного обучения. Практическая значимость исследования заключается в создании доступного дистанционного курса для подготовки специалистов в области физики наноструктур из квантовых метаматериалов.

Базой исследования для создания дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов в системе управления обучением MOODLE является образовательный портал ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И. Н. Ульянова».

Описание этапов проектирования курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов в системе управления обучением MOODLE

Развитие квантовых технологий и метаматериалов требует системного подхода к подготовке специалистов, способных интегрировать принципы квантовой оптики и нанофотоники в разрабатываемые устройства, а курс на платформе MOODLE обеспечивает доступность обучения для широкого круга студентов и исследователей, включая отдалённые регионы и межуниверситетские программы. Интерактивные и мультимедийные инструменты системы управления обучением MOODLE позволяют эффективно моделировать сложные физические явления (например, нелинейные эффекты в метаматериалах или взаимодействие квантовых эмиттеров с нанорезонаторами), что критически важно для освоения междисциплинарной тематики, сочетающей квантовую механику, оптику и нанотехнологии. В условиях глобальной потребности в специалистах по квантовым технологиям (оптические вычисления, сенсоры, коммуникации) разработка структурированного дистанционного курса с использованием системы управления обучением MOODLE становится ключевым инструментом стандартизации образовательных стандартов, сокращения временных затрат на обучение и повышения качества подготовки кадров для высокотехнологичных отраслей.

Для успешного создания дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, охватывающего 108 часов учебной нагрузки (3 зачётные единицы), необходимо последовательно пройти этапы концептуального проектирования, разработки контента, технической реализации и сопровождения. Каждый этап логически вытекает из предыдущего и направлен на обеспечение высокой эффективности обучения, доступности материала и вовлечённости студентов.

На первом этапе создания дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов проводится анализ образовательных потребностей и целевой аудитории. Курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов разработан для студентов, магистрантов и аспирантов, обладающих базовыми знаниями в области квантовой механики и электродинамики, но требующих углублённого понимания специфики квантовой оптики наноструктур и метаматериалов на основе анализа существующих курсов [1–10]. Анализ актуальных научных публикаций и требований рабочих программ позволяет определить ключевые темы, которые должны быть представлены в курсе, такие как теория Блоха, плазмонные эффекты, фотонные кристаллы и их приложения в квантовых технологиях. На этом этапе также обозначаются ожидаемые результаты обучения, включая умение моделировать квантовые

процессы в метаматериалах и анализировать современные исследования в области.

Далее формируется концепция курса, которая определяет его структуру, методику преподавания и формы контроля. В связи с дистанционной формой обучения особое внимание уделяется использованию интерактивных элементов, таких как лекции, интерактивные симуляции и задания с обратной связью. Структура курса включает девять тем, каждая из которых посвящена отдельному аспекту квантовой оптики метаматериалов, начиная с основ теории Блоха и заканчивая актуальными приложениями в квантовых технологиях. В концепции указывается, что каждая тема будет представлена не только в теоретическом, но и в практическом аспекте, с использованием численных методов и программного обеспечения для моделирования.

Следующим шагом становится разработка учебно-методического обеспечения, включающего сценарии лекционных занятий, задания для практических работ и материалы для самостоятельной работы. Для каждой из девяти тем создаются детализированные планы лекций, которые включают основные понятия, исторический контекст, примеры из научных исследований и актуальные приложения. Особое внимание уделяется визуализации сложных процессов, таких как формирование зонной структуры в фотонных кристаллах или поведение плазмонных мод в наноструктурах. Для практических занятий разрабатываются задания, направленные на освоение численных методов, например, моделирование зонной структуры с помощью программного обеспечения языка программирования Python, а также анализ нелинейных оптических эффектов в метаматериалах.

Одновременно с разработкой контента дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов осуществляется проектирование технической инфраструктуры курса в системе управления обучением MOODLE. На этом этапе создаётся структура курса, включающая разделы для каждой темы, форумы для обсуждений, системы оценки и обратной связи. Важным элементом является интеграция мультимедийных материалов, таких как лекции, презентации, интерактивные симуляции и ссылки на научные статьи. Для практических занятий в системе управления орбучением MOODLE настраиваются специальные инструменты, такие как задания с автоматизированной проверкой или задачи, требующие загрузки файлов с результатами моделирования физических процессов. Также разрабатывается система автоматизированных тестов для промежуточного и итогового контроля, которая позволяет оценивать понимание студентов теоретических и практических аспектов курса.

На следующем этапе разработки курса производится создание мультимедийных материалов, которые являются неотъемлемой частью дистанционного обучения. Лекции записываются с использованием современных инструментов, таких как OBS Studio, с подробными пояснениями и демонстрацией ключевых моментов. Презентации оформляются с учётом принципов доступности, включают анимации и схемы для наглядного объяснения сложных процессов. Для практических заданий разрабатываются пошаговые инструкции с примерами кода и скриншотами интерфейсов программного обеспечения, что облегчает самостоятельное освоение материала студентами. Также подбираются и адаптируются интерактивные симуляции, например, из библиотеки на языке Python или других образовательных ресурсов, для демонстрации физических процессов.

Важным аспектом разработки курса является организация интерактивного взаимодействия между преподавателем и студентами. В системе управления обучением MOODLE создаются форумы для обсуждения актуальных тем, где студенты могут задавать вопросы и делиться своими результатами исследований. Также организуются вебинары и онлайн-консультации, на которых преподаватель разъясняет сложные моменты и помогает студентам в решении практических задач. Для мотивации сту-

дентов и поддержания интереса к курсу можно использовать систему дополнительных баллов за активное участие в обсуждениях или выполнение дополнительных заданий. Это не только улучшает вовлечённость, но и способствует более глубокому усвоению материала.

Далее осуществляется пилотное тестирование курса в условиях реального обучения. Курс запускается в тестовом режиме на небольшой группе студентов, чтобы выявить возможные технические или методические проблемы. На этом этапе собирается обратная связь от участников, анализируются трудности, с которыми они столкнулись, и вносятся коррективы в содержание и структуру курса. Особое внимание уделяется удобству использования системы управления обучением MOODLE, качеству мультимедийных материалов и эффективности практических заданий. После внесения необходимых изменений курс готов к масштабному запуску.

Одновременно разрабатывается система оценки и контроля знаний, которая соответствует требованиям образовательного стандарта. Контроль осуществляется через комбинацию автоматизированных тестов, практических заданий и итогового проекта. Тесты включают вопросы разного уровня сложности, проверяющие как теоретическое понимание материала, так и умение применять его на практике. Практическое задание может включать моделирование конкретной наноструктуры с использованием численных методов и анализ полученных результатов. Итоговый проект предусматривает выполнение студентами исследовательской работы, например, разработку модели метаматериала для конкретного приложения и подготовку отчёта с презентацией результатов. Эта работа позволяет оценить глубину освоения материала и способность студентов к самостоятельной научной деятельности.

На этапе подготовки преподавателей и методистов организуются семинары и тренинги, на которых преподаватели знакомятся с особенностями дистанционного обучения, инструментами системы управления обучением MOODLE и методами оценки результатов. Также разрабатываются рекомендации по ведению занятий, включая примеры эффективного взаимодействия со студентами в онлайн-формате. Методисты обеспечивают сопровождение процесса обучения, наблюдая активность студентов и качество выполняемых заданий. Это позволяет своевременно выявлять пробелы в знаниях и корректировать учебный процесс.

Затем осуществляется запуск курса в полном формате с зачислением всех студентов группы. На этом этапе проводится инструктаж по использованию системы управления обучением MOODLE, правилами выполнения заданий и системами оценки. Студенты получают доступ ко всем материалам курса, включая лекции, презентации и практические задания. Преподаватель обеспечивает сопровождение процесса обучения, отвечая на вопросы и давая консультации как в асинхронном, так и в синхронном формате. Регулярный мониторинг позволяет выявлять проблемные моменты и вносить коррективы в учебный процесс.

В процессе обучения обеспечивается постоянная обратная связь как от студентов, так и от преподавателей. Студенты могут оставлять отзывы о сложности материала, качестве мультимедийных ресурсов и эффективности практических заданий. Эта информация позволяет оперативно корректировать курс, добавляя дополнительные материалы или изменяя формат представления информации. Также проводится анализ результатов выполнения заданий и тестов для выявления слабых мест в понимании материала и адаптации учебного процесса.

На заключительном этапе разработки дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов осуществляется анализ результатов обучения и перспективы развития курса. После завершения дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов проводится итоговый анализ

успеваемости студентов, оценивается эффективность используемых методик и выявляются направления для дальнейшего улучшения. Обратная связь от студентов и преподавателей позволяет определить, какие темы требуют углубления или изменения формата представления. Также разрабатываются планы по обновлению курса с учётом новых научных достижений в области квантовой оптики метаматериалов. Это может включать добавление новых тем, обновление практических заданий и интеграцию современных инструментов моделирования. Такой подход обеспечивает не только успешное освоение студентами курса, но и постоянное развитие учебного процесса с учётом потребностей и современных требований науки.

Первая тема посвящена изучению введения в квантовую оптику и электродинамику периодических структур. Вторая тема посвящена изучению квантовой теории взаимодействия света с периодическими наноструктурами. Третья тема посвящена изучению плазмонных наноструктур и квантовых эффектов наноплазмоники. Четвёртая тема посвящена изучению теории фотонных кристаллов и запрещённых зон. Пятая тема посвящена изучению нелинейных оптических эффектов в периодических метаматериалах и машинного обучения в дизайне метаматериалов. Шестая тема посвящена изучению квантовых источников света на основе метаматериалов. Седьмая тема посвящена изучению квантовой информации и перспектив применения метаматериалов в квантовых компьютерах, связи, криптографии. Восьмая тема посвящена изучению численных методов в квантовой оптике метаматериалов. Девятая тема посвящена изучению квантовых флуктуаций электромагнитного поля в нанощелях и эффекта Казимира в метаматериалах.

Создание дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, рассчитанного на 108 академических часов (3 зачётные единицы), требует систематического подхода, учитывающего как научную сложность тематики, так и особенности дистанционного формата обучения. Реализация курса должна начинаться с глубокого анализа образовательных потребностей студентов, определяя не только их базовые знания в области квантовой механики и электродинамики, но и уровень подготовки в смежных областях, таких как численное моделирование и обработка экспериментальных данных физических экспериментов.

На первом этапе необходимо разработать детальную концепцию дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, которая будет включать не только перечень тем, но и логическую последовательность их изложения с учётом постепенного усложнения материала. Тематика начинается с фундаментальных концепций, таких как теория Блоха и зонная структура, что обеспечивает студентам прочную основу для понимания последующих тем, посвящённых взаимодействию света с периодическими наноструктурами и плазмонным эффектам. Особое внимание следует уделить мотивации студентов, обосновывая актуальность изучаемых тем современными приложениями в квантовых технологиях, что способствует формированию исследовательского интереса.

Следующим важным шагом становится проработка структуры каждого учебного модуля с точки зрения его педагогической целесообразности. Каждая из девяти тем должна быть разбита на логические блоки, включающие теоретическую часть, практическое применение и контрольные задания. Например, тема о зонной структуре фотонных кристаллов должна сопровождаться интерактивными симуляциями для наглядной демонстрации формирования запрещённых зон, а тема о нелинейных оптических эффектах должна включать задачи на расчёт параметров нелинейности в различных метаматериалах. Это позволяет студентам не только усваивать теоретический материал, но и применять его на практике, что является ключевым в формировании профессиональных компетенций.

На этапе разработки учебно-методического обеспечения дистанционного курса необходимо уделить повышенное внимание созданию мультимедийных материалов, которые помогут компенсировать отсутствие очного взаимодействия. Лекции должны быть структурированы так, чтобы каждая из них фокусировалась на одном ключевом аспекте темы, сопровождаясь визуальными материалами, такими как анимации квантовых переходов в наноструктурах или графики дисперсионных зависимостей в фотонных кристаллах. Кроме того, следует предусмотреть интерактивные элементы, например, расчётные задачи с автоматизированной проверкой, которые позволят студентам сразу же получать обратную связь и корректировать свои знания.

Важным аспектом педагогического проектирования является интеграция в курс современных численных методов, без которых невозможно эффективное моделирование квантовых процессов в метаматериалах. Тема, посвящённая численным методам, должна включать не только теорию, но и практические примеры использования программного обеспечения, такого как COMSOL Multiphysics или библиотеки языка Python для расчёта электромагнитных полей. Это позволит студентам не только понять принципы моделирования, но и приобрести навыки, востребованные в научных исследованиях и промышленности. При этом важно предусмотреть разные уровни сложности заданий, чтобы учесть разнообразие подготовки участников.

Для обеспечения эффективного взаимодействия в дистанционном формате необходимо разработать систему интерактивных форумов и обсуждений, где студенты смогут задавать вопросы, делиться решениями практических задач и обсуждать актуальные научные статьи. Особое значение приобретают синхронные сессии, такие как вебинары, на которых преподаватель может разъяснить сложные моменты и организовать групповую работу по решению исследовательских задач. Такие элементы не только усиливают вовлечённость студентов, но и способствуют формированию сообщества, что особенно важно для сложных и специализированных курсов.

На этапе проектирования системы контроля знаний дистанционного курса необходимо предусмотреть комплексный подход, сочетающий автоматизированные тесты, практические задания и итоговый исследовательский проект. Тесты должны проверять как теоретическое понимание материала, так и умение применять его для решения типовых задач. Практическое задание, например, моделирование плазмонных мод в наноструктуре, позволит оценить навыки работы с программным обеспечением, а итоговый проект даст возможность студентам проявить творческий подход и применить полученные знания в исследовательской деятельности. При этом важно, чтобы система оценки была прозрачной и мотивирующей, с возможностью повторного выполнения заданий при необходимости.

Одновременно с разработкой контента необходимо подготовить техническую инфраструктуру курса в системе управления обучением MOODLE, обеспечивая удобный доступ к материалам и функционалу. Структура курса должна быть интуитивно понятной, с чётким разделением на модули и темы, а также с возможностью навигации между ними. Важно предусмотреть систему уведомлений о новых материалах или сроках сдачи заданий, что поможет студентам эффективно планировать своё время. Также следует интегрировать инструменты для совместной работы, такие как вики-страницы для группового написания обзоров литературы или обсуждений актуальных научных вопросов.

На этапе тестирования и пилотирования курса необходимо задействовать небольшую группу студентов или экспертов для выявления возможных проблем в структуре курса, качестве мультимедийных материалов и эффективности практических заданий. Обратная связь от участников позволит скорректировать содержание и формат представления информации, устранив сложности в восприятии сложных концепций. Особое

внимание следует уделить анализу результатов выполнения практических заданий и тестов, чтобы выявить темы, требующие дополнительного объяснения или усложнения.

После завершения пилотного тестирования и внесения необходимых коррективов курс запускается в полном объёме, с сопровождением преподавателя, который обеспечивает обратную связь и консультации. Важно поддерживать активное взаимодействие между преподавателем и студентами, используя как асинхронные, так и синхронные формы коммуникации. Регулярный мониторинг успеваемости и вовлечённости студентов позволит оперативно реагировать на возникающие трудности и вносить изменения в учебный процесс.

По завершении дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов необходимо провести анализ его эффективности, оценивая не только успеваемость студентов, но и качество усвоения материала. Обратная связь от участников поможет выявить сильные и слабые стороны курса, а также определить направления для его дальнейшего развития. Особое внимание следует уделить обновлению контента с учётом новых научных достижений, например, в области квантовых технологий или новых методов моделирования, что позволит курсу оставаться актуальным и востребованным.

Результаты разработки избранных элементов дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов в системе управления обучением MOODLE

Первая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению введения в квантовую оптику и электродинамику периодических структур. Вторая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению квантовой теории взаимодействия света с периодическими наноструктурами. Третья лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению плазмонных наноструктур и квантовых эффектов наноплазмоники. Четвёртая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению теории фотонных кристаллов и запрещённых зон. Пятая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению нелинейных оптических эффектов в периодических метаматериалах и машинного обучения в дизайне метаматериалов. Шестая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению квантовых источников света на основе метаматериалов. Седьмая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению квантовой информации и перспектив применения метаматериалов в квантовых компьютерах, связи, криптографии. Восьмая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению численных методов в квантовой оптике метаматериалов. Девятая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению квантовых флуктуаций электромагнитного поля в нанощелях и эффекта Казимира в метаматериалах.

На рис. 1 приведено изображение страницы тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых

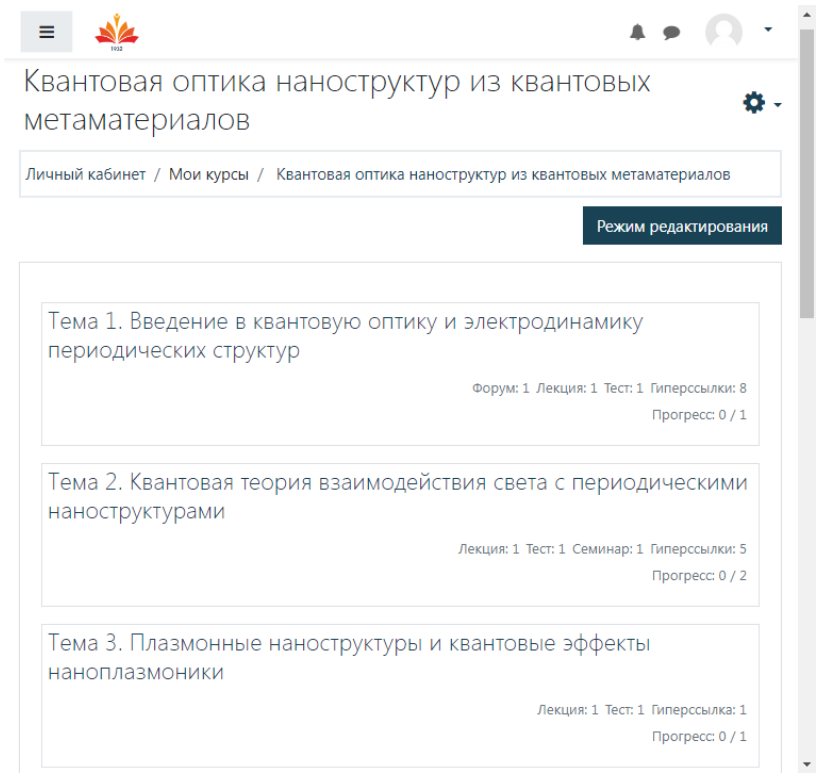


Рис. 1. Страница тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

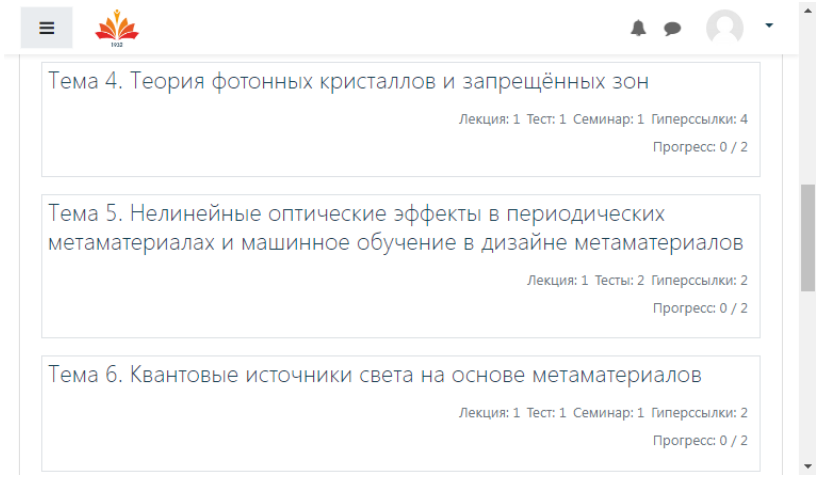


Рис. 2. Страница тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериаловм, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 приведено изображение страницы тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение страницы элементов первой темы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на

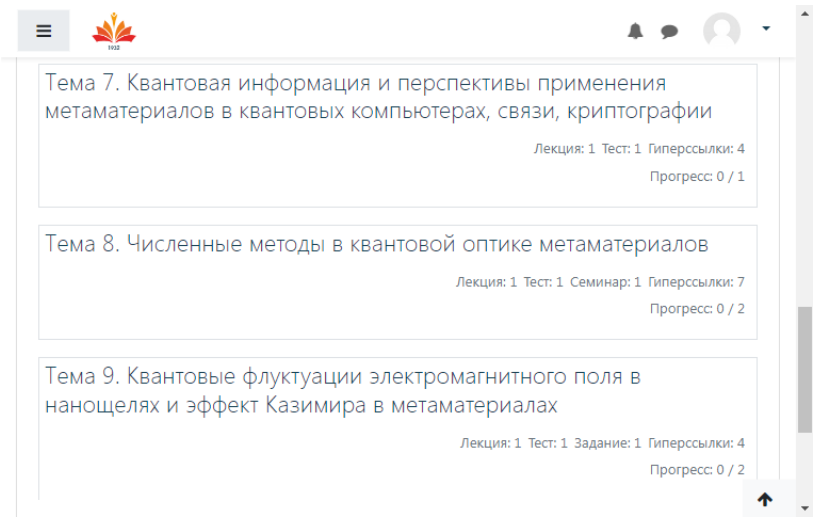


Рис. 3. Страница тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

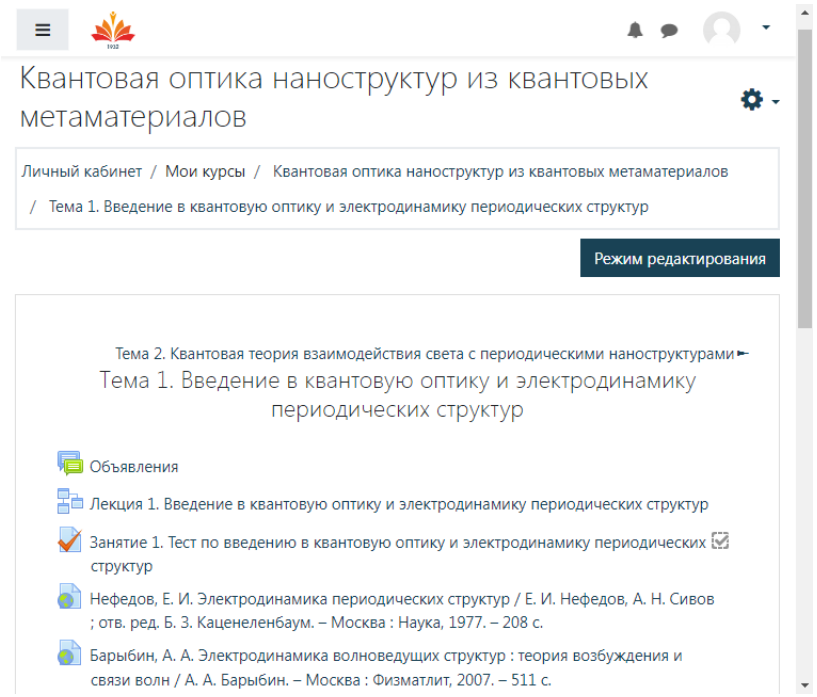


Рис. 4. Страница элементов первой темы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 5 приведено изображение страницы элементов второй темы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 6 приведено изображение страницы элементов третьей темы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

Первое занятие проводится в форме теста по введению в квантовую оптику и электродинамику периодических структур. Второе занятие проводится в форме теса по

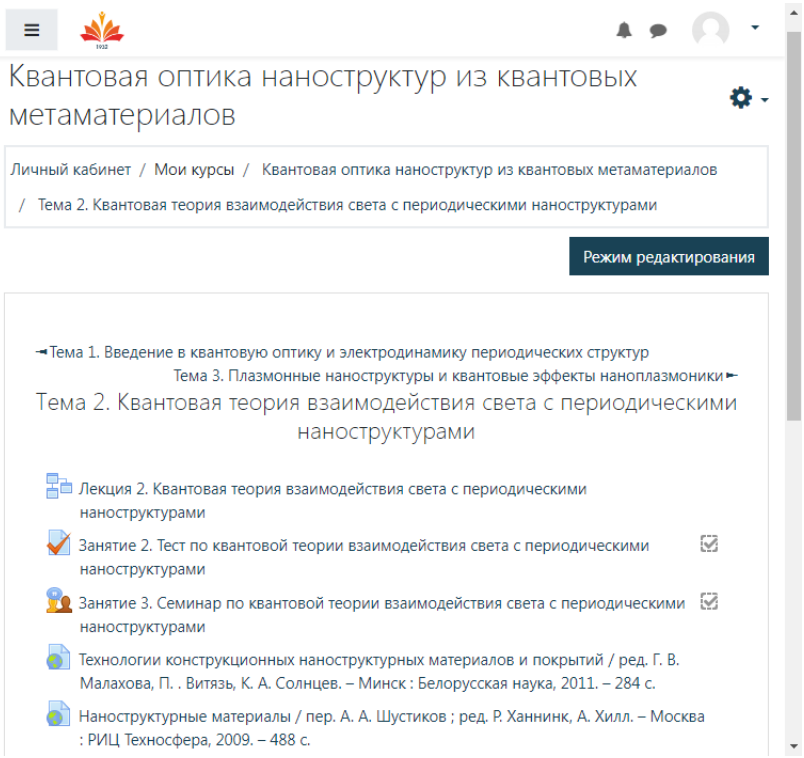


Рис. 5. Страница элементов второй темы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

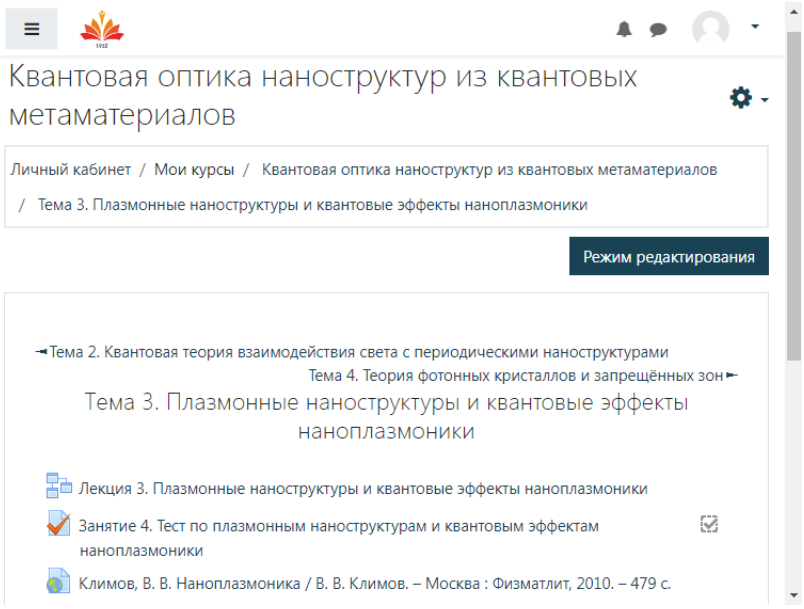


Рис. 6. Страница элементов третьей темы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

квантовой теории взаимодействия света с периодическими наноструктурами. Третье занятие проводится в форме семинара по квантовой теории взаимодействия света с периодическими наноструктурами. Четвёртое занятие проводится в форме теста по плазмонным наноструктурам и квантовым эффектам наноплазмоники. Пятое занятие проводится в форме теста по теории фотонных кристаллов и запрещённых зон. Шестое

занятие проводится в форме семинара по теории фотонных кристаллов и запрещённых зон. Седьмое занятие проводится в форме теста по нелинейным оптическим эффектам в периодических метаматериалах и машинному обучению в дизайне метаматериалов. Восьмое занятие проводится в форме первой контрольной работы. Девятое занятие проводится в форме теста по квантовым источникам света на основе метаматериалов. Десятое занятие проводится в форме семинара по квантовым источникам света на основе метаматериалов. Одиннадцатое занятие проводится в форме теста по квантовой информации и перспективам применения метаматериалов в квантовых компьютерах, связи, криптографии. Двенадцатое занятие проводится в форме теста по численным методам в квантовой оптике метаматериалов. Тринадцатое занятие проводится в форме семинара по численным методам в квантовой оптике метаматериалов. Четырнадцатое занятие проводится в форме теста по квантовым флуктуациям электромагнитного поля в нанощелях и эффекту Казимира в метаматериалах. Пятнадцатое занятие проводится в форме итоговой работы по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов.

Процесс разработки и педагогического проектирования дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов подтвердил возможность успешного адаптации высоконаучного и междисциплинарного содержания в дистанционном формате, что требует не только качественного теоретического освещения тем, но и активного вовлечения студентов через интерактивные элементы и практические задания. Одним из ключевых достижений стало формирование логически последовательной структуры курса, где каждая тема, начиная от фундаментальных концепций квантовой электродинамики и теории Блоха и заканчивая передовыми направлениями квантовой информации и наноплазмоники, органично переходит к следующей, обеспечивая плавное усложнение материала и постепенное формирование научного мышления.

Важной особенностью дистанционного курса стала интеграция современных численных методов и программного обеспечения, что позволило не только теоретически объяснить физические процессы, но и предоставить студентам практический инструментарий для их моделирования. Особое внимание уделялось модулю по численным методам, где использование таких платформ, как COMSOL или специализированных библиотек языка Python, создало условия для развития навыков, востребованных в научно-исследовательской и промышленной сферах, что сделало курс более практико-ориентированным и актуальным для современных требований к специалистам в области нанофотоники и квантовых технологий.

Анализ процесса проектирования показал, что эффективное дистанционное обучение в области квантовой оптики невозможно без мультимедийной поддержки, включающей лекции, интерактивные симуляции и визуализацию сложных квантовых явлений, таких как формирование запрещённых зон в фотонных кристаллах или квантовые флуктуации в нанощелях. Такие материалы не только облегчают восприятие абстрактных концепций, но и компенсируют отсутствие непосредственного взаимодействия с преподавателем, делая курс доступным для студентов с разным уровнем подготовки.

Особого внимания в процессе проектирования требовала система контроля и оценки знаний, которая должна была одновременно проверять теоретическое понимание материала и практическое применение полученных навыков. Системный подход, включающий автоматизированные тесты, практические задания по моделированию и итоговый исследовательский проект, позволил оценить не только глубину усвоения материала, но и способность студентов критически анализировать научные данные и разрабатывать собственные решения, что является важным аспектом подготовки будущих исследователей и инженеров в области квантовых технологий.

Ещё один значимый вывод касается необходимости постоянного взаимодействия

между преподавателем и обучающимися в дистанционном формате, которое реализовывалось через асинхронные форумы для обсуждения научных статей, синхронные вебинары для разбора сложных вопросов и групповую работу над исследовательскими задачами. Такая система не только сохранила академическую атмосферу курса, но и способствовала формированию профессионального сообщества, что особенно важно для междисциплинарных и высокотехнологичных направлений.

Важным аспектом, выявленным в процессе разработки, стало необходимость непрерывного обновления и корректировки контента с учётом последних научных достижений, таких как разработка новых квантовых источников света на основе метаматериалов или применение метаматериалов в квантовых компьютерах и криптографии. Это подчеркивает динамичность курса и его способность оставаться востребованным в условиях быстро развивающихся технологий, что делает его не только образовательной платформой, но и инструментом для вовлечения студентов в актуальные научные исследования.

Наконец, использование системы управления обучением MOODLE в качестве основы для реализации курса продемонстрировало её гибкость и функциональность для комплексного дистанционного обучения, особенно в условиях, требующих интеграции разноформатных материалов и инструментов для оценки знаний. Грамотная настройка интерфейса, система уведомлений и возможность использования плагинов для автоматизации проверки заданий существенно упростили организационный процесс и повысили доступность курса для обучающихся. Это позволило сконцентрироваться на педагогическом проектировании и содержании, не отвлекаясь на технические проблемы, что в итоге повысило качество образовательного процесса.

Материалы первой лекции по введению в квантовую оптику и электродинамику периодических структур

Квантовая оптика наноструктур изучает взаимодействие света с веществом на микроскопическом уровне, где проявляются квантовые эффекты. Периодические структуры, такие как фотонные кристаллы, метаматериалы и диэлектрические решётки, демонстрируют уникальные оптические свойства, обусловленные когерентными эффектами и периодичностью потенциала. В основе описания оптических свойств этих систем лежит теория Блоха, которая связывает периодичность структуры с формированием зонной структуры для волновых функций. Изучение взаимодействия электромагнитного излучения с периодическими структурами составляет основу современной нанооптики и фотонных технологий. Периодические системы, такие как кристаллические решётки, фотонные кристаллы и метаматериалы, демонстрируют уникальные оптические свойства, которые невозможно объяснить в рамках классической волновой оптики. Теория Блоха, первоначально разработанная для описания электронов в кристаллах, оказывается мощным инструментом и для анализа электромагнитных волн в периодических средах. Рассмотрим основные физические принципы этой теории, выведем основные уравнения и проанализируем физический смысл уравнений.

Рассмотрим электромагнитное поле в сплошной среде с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(\mathbf{r})$, периодической с вектором трансляции $\mathbf{R}$:

$$\varepsilon(\mathbf{r}+\mathbf{R}) = \varepsilon(\mathbf{r}) \ . \tag{1}$$

Эта периодичность означает, что свойства среды повторяются через каждый элементарный период. Для анализа электромагнитных волн в такой среде удобно использовать

комплексное представление поля:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \mathrm{Re}\left[\mathbf{E}(\mathbf{r})\, e^{-i\omega t}\right] , \tag{2}$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r},t) = \mathrm{Re}\left[\mathbf{H}(\mathbf{r})\, e^{-i\omega t}\right] . \tag{3}$$

Подставляя эти выражения в уравнения Максвелла в отсутствие источников, получаем систему уравнений для амплитуд:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) = i\omega\mu \mathbf{H}(\mathbf{r}) , \\ \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) = -i\omega\varepsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r}) . \end{cases} \tag{4}$$

Исключая $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ через первое уравнение, приходим к волновому уравнению для электрического поля:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r})\right] = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) . \tag{5}$$

Это уравнение является аналогом уравнения Шрёдингера для электронов в периодическом потенциале.

Векторное волновое уравнение для электрического поля $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ в области без свободных зарядов:

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) - \nabla\left(\nabla \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r})\right) + \varepsilon_0\mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\varepsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r})\right) = 0 . \tag{6}$$

Для монохроматического поля $\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \mathbf{E}(\mathbf{r})\, e^{-i\omega t}$ это уравнение сводится следующему уравнению

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \nabla\left(\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \cdot \left(\varepsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r})\right)\right) + \omega^2 \varepsilon_0\mu_0 \varepsilon(\mathbf{r})\, \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 . \tag{7}$$

Для изотропной среды с $\nabla \cdot \left(\varepsilon(\mathbf{r})\, \mathbf{E}(\mathbf{r})\right) = 0$ получаем упрощённое уравнение:

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(\mathbf{r})\, \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 , \tag{8}$$

где $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ – скорость света в вакууме.

Решения уравнения (7) в периодических структурах ищут в виде волновых пакетов Блоха:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) , \tag{9}$$

где $\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ – периодическая функция с периодом решётки:

$$\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r} + \mathbf{R}) = \mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) . \tag{10}$$

Подставляя (8) в (7), получаем уравнение для функции Блоха:

$$\left(\nabla^2 + 2i\mathbf{k} \cdot \nabla + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(\mathbf{r})\right) \mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = 0 . \tag{11}$$

Для анализа свойств решений введём оператор $\mathcal{H}_{\mathbf{k}} = -\nabla^2 - \frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon(\mathbf{r})$, однако в данном контексте удобнее рассматривать уравнение для волновой функции электрона в аналогичной периодической среде, чтобы проиллюстрировать обобщение.

Представим электрическое поле в виде волнового уравнения в представлении Блоха:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} \mathbf{E}_{\mathbf{k},\mathbf{G}} e^{i(\mathbf{k}+\mathbf{G})\cdot\mathbf{r}} , \tag{12}$$

где $\mathbf{E}_{\mathbf{k},\mathbf{G}}$ – амплитуды Фурье-компонент. Подстановка этого разложения в волновое уравнение даёт следующее уравнение:

$$\sum_{\mathbf{G}'} \left[|\mathbf{k}+\mathbf{G}|^2 \delta_{\mathbf{G},\mathbf{G}'} - k_0^2 \varepsilon_{\mathbf{G}-\mathbf{G}'} \right] \mathbf{E}_{\mathbf{k},\mathbf{G}'} = 0 \, . \tag{13}$$

Это матричное уравнение может быть записано в виде:

$$\mathbf{M}\left(\mathbf{k}\right) \mathbf{E}_{\mathbf{k}} = 0 \, , \tag{14}$$

где $\mathbf{M}\left(\mathbf{k}\right)$ – матрица с элементами:

$$M_{\mathbf{G},\mathbf{G}'}\left(\mathbf{k}\right) = \left|\mathbf{k}+\mathbf{G}\right|^2 \delta_{\mathbf{G},\mathbf{G}'} - k_0^2 \varepsilon_{\mathbf{G}-\mathbf{G}'} \, . \tag{15}$$

Ненулевые решения существуют только при выполнении условия:

$$\det \mathbf{M}\left(\mathbf{k}\right) = 0 \, . \tag{16}$$

Это уравнение определяет зависимость частоты ω от волнового вектора $\mathbf{k}$ и называется дисперсионным уравнением.

Зонная структура в электродинамике периодических сред имеет глубокий физический смысл. Разрешённые зоны соответствуют частотам, при которых электромагнитные волны могут распространяться в структуре, а запрещённые зоны соответствуют частотам, при которых распространение запрещено. На границах зон происходят резкие изменения дисперсионных характеристик, что приводит к уникальным оптическим эффектам.

Рассмотрим частицу в периодическом потенциале $V\left(\mathbf{r}\right)$ для аналогии с электродинамикой:

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V\left(\mathbf{r}\right) \, , \quad V\left(\mathbf{r}+\mathbf{R}\right) = V\left(\mathbf{r}\right) \, . \tag{17}$$

Волновые функции ищутся в виде:

$$\psi_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) \, , \tag{18}$$

где $u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right)$ периодична с периодом решётки. Подстановка в уравнение Шрёдингера даёт:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\left(\nabla + i\mathbf{k}\right)^2 + V\left(\mathbf{r}\right) \right) u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) = E_{\mathbf{k}} u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) \, . \tag{19}$$

Раскрывая квадрат, получаем следующее выражение:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + \frac{i\hbar^2}{m}\mathbf{k}\cdot\nabla + V\left(\mathbf{r}\right) \right) u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) = E_{\mathbf{k}} u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) \, . \tag{20}$$

Введём эффективный оператор Гамильтона для функции Блоха:

$$\mathcal{H}_{\mathbf{k}} = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + \frac{i\hbar^2}{m}\mathbf{k}\cdot\nabla + V\left(\mathbf{r}\right) \, , \tag{21}$$

сдвинув энергию на $\hbar^2 k^2 / \left(2m\right)$:

$$\left(\mathcal{H}_{\mathbf{k}} + \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \right) u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) = E_{\mathbf{k}} u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) \, . \tag{22}$$

Таким образом, энергия $E_{\mathbf{k}}$ включает волновой вектор $\mathbf{k}$ и зависящую от $\mathbf{k}$ энергию решётки:

$$E_{\mathbf{k}} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + \Delta E_{\mathbf{k}} \, , \tag{23}$$

где $\Delta E_{\mathbf{k}}$ – собственные значения оператора $\mathcal{H}_{\mathbf{k}}$.

Периодическая функция Блоха $u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ должна быть решением уравнения:

$$\mathcal{H}_{\mathbf{k}}\psi_{\mathbf{k}} = \left(E_{\mathbf{k}} - \frac{\hbar^2 k^2}{2m}\right)\psi_{\mathbf{k}} \,. \tag{24}$$

Спектр энергии $\Delta E_{\mathbf{k}}$ является периодической функцией обратной решётки:

$$\Delta E_{\mathbf{k}+\mathbf{G}} = \Delta E_{\mathbf{k}} \,, \tag{25}$$

где $\mathbf{G}$ – вектор обратной решётки. Это приводит к образованию зон Бриллюэна — областей в пространстве волновых векторов, где энергия изменяется непрерывно.

В одномерном случае уравнение Блоха для функции $u_k(x)$ принимает следующий вид:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2} + V(x)\right)u_k(x) + \frac{i\hbar^2 k}{m}\frac{du_k}{dx} + \frac{\hbar^2 k^2}{2m}u_k(x) = E_k u_k(x) \,. \tag{26}$$

Используя периодичность $V(x+a) = V(x)$, где a – период решётки, ищем решения вида:

$$u_k(x+a) = u_k(x)\, e^{ika} \,. \tag{27}$$

Пусть $u_k(x) = e^{-ikx}\psi(x)$, где $\psi(x+a) = \psi(x)$. Тогда получаем уравнение для $\psi(x)$:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2} + V(x)\right)\psi(x) = \left(E_k - \frac{\hbar^2 k^2}{2m}\right)\psi(x) \,. \tag{28}$$

Это уравнение совпадает с уравнением Шрёдингера для частицы в потенциале $V(x)$, но сдвигом энергии.

Введём оператор энергии в кристалле:

$$E(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + E_n(\mathbf{k}) \,, \tag{29}$$

где $E_n(\mathbf{k})$ – дискретные значения энергии для n-ой зоны. Вектор $\mathbf{k}$ изменяется в первой зоне Бриллюэна. Для границ зоны Бриллюэна выполняется условие:

$$E(\mathbf{k}+\mathbf{G}) = E(\mathbf{k}) \,. \tag{30}$$

В результате образуются разрешённые и запрещённые зоны энергий. В оптике аналогично формируются разрешенные и запрещённые полосы частот для распространения электромагнитных волн.

В случае периодических диэлектрических структур уравнение для электромагнитных волн принимает вид:

$$\nabla^2\mathbf{E}(\mathbf{r}) + \omega^2\varepsilon(\mathbf{r})\,\mu_0\mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 \,. \tag{31}$$

Используя подстановку Блоха (8), получаем уравнение для функции $\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$:

$$\nabla^2\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) + 2i\mathbf{k}\cdot\nabla\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) - k^2\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) + \omega^2\varepsilon(\mathbf{r})\,\mu_0\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = 0 \,. \tag{32}$$

Перепишем это уравнение в виде:

$$\mathcal{H}_{\mathbf{k}}\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \omega^2\varepsilon_0\mu_0 Q_{\mathbf{k}}\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) \,, \tag{33}$$

где $Q_{\mathbf{k}} = \frac{\omega^2\varepsilon_0\mu_0 - k^2}{\omega^2\varepsilon_0\mu_0}$ – нормированная энергия, соответствующая частоте ω. Решение этого уравнения приводит к спектру частот ω, разрешенных для распространения в

периодической структуре. Запрещённые зоны соответствуют частотам, при которых волны не могут распространяться, аналогично запрещенным зонам для электронов в кристаллах.

Рассмотрим одномерный фотонный кристалл с чередующимися слоями диэлектриков с диэлектрическими проницаемостями ε_1 и ε_2, толщинами d_1 и d_2 соответственно. Для нормальной падающей волны с волновым вектором k уравнения Максвелла в слоях описываются:

$$E_z(x) = \begin{cases} Ae^{ik_1 x} + Be^{-ik_1 x}, & \text{в слое } \varepsilon_1 \ , \\ Ce^{ik_2 x} + De^{-ik_2 x}, & \text{в слое } \varepsilon_2 \ , \end{cases} \tag{34}$$

где $k_{1,2} = \omega\sqrt{\varepsilon_{1,2}\mu_0}$.

Применим граничные условия в точках $x = n(d_1 + d_2)$:

$$E\left(0^+\right) = E\left(0^-\right) \ , \quad \frac{1}{\varepsilon_1}\frac{dE}{dx}\Big|_{0^+} = \frac{1}{\varepsilon_2}\frac{dE}{dx}\Big|_{0^-} \ . \tag{35}$$

Решение этих условий для периодической структуры приводит к условию периодичности Блоха для амплитуд:

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}_n = e^{i\kappa(d_1+d_2)} \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}_{n+1} \ , \tag{36}$$

где κ – волновой вектор Блоха. Условие существования нетривиальных решений даёт дисперсионное уравнение для зон:

$$\cos(\kappa a) = \cos(k_1 d_1)\cos(k_2 d_2) - \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_1 k_2}{\varepsilon_2 k_1} + \frac{\varepsilon_2 k_1}{\varepsilon_1 k_2}\right)\sin(k_1 d_1)\sin(k_2 d_2) \ . \tag{37}$$

Решение этого уравнения для различных ω даёт зоны разрешённых частот.

В трёхмерном случае зонная структура материала становится более сложной. Поверхности постоянной энергии в обратном пространстве формируют зоны Бриллюэна, аналогично случаю электронов в кристаллах. На границах зон Бриллюэна происходят резкие изменения дисперсионных соотношений, что приводит к формированию запрещённых зон.

Теория Блоха играет ключевую роль в описании оптических свойств периодических структур, аналогично её применению в квантовой механике. Зонная структура формирует запрещённые полосы для распространения электромагнитных волн в фотонных кристаллах, что позволяет контролировать распространение света на наноуровне. Метаматериалы, фотонные волноводы и оптоэлектронные устройства нового поколения основаны на этих принципах. Основные уравнения теории включают:

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon(\mathbf{r})\,\mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 \ , \tag{38}$$

$$\mathcal{H}_{\mathbf{k}} u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \left(E_{\mathbf{k}} - \frac{\hbar^2 k^2}{2m}\right) u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) \ , \tag{39}$$

$$\cos(\kappa a) = \cos(k_1 d_1)\cos(k_2 d_2) - \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_1 k_2}{\varepsilon_2 k_1} + \frac{\varepsilon_2 k_1}{\varepsilon_1 k_2}\right)\sin(k_1 d_1)\sin(k_2 d_2) \ . \tag{40}$$

Эти результаты демонстрируют тесную связь между квантовой механикой и классической электродинамикой в периодических структурах, что позволяет разрабатывать новые оптические материалы и устройства с заданными физическими свойствами. Теория Блоха является мощным инструментом для описания электромагнитных волн в периодических структурах. Теория Блоха позволяет объяснить такие физические явления,

как зонная структура фотонных кристаллов, полные запрещённые зоны для фотонов и формирование поверхностных состояний на границах фотонных кристаллов. Теория Блоха позволяет описывать сложные оптические явления, такие как зонная структура, фотонные запрещённые зоны и дифракция от кристаллических решёток. Понимание этих принципов открывает возможности для создания новых оптических материалов и устройств с заданными физическими свойствами. Периодичность диэлектрической проницаемости приводит к образованию зонной структуры в спектре электромагнитных волн. Теория Блоха находит широкое применение в современной оптике и фотонных технологиях, что делает её одной из ключевых концепций современной физики.

Заключение

Описан процесс разработки дистанционного курса, охватывающего ключевые аспекты физики метаматериалов. Дистанционный курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов разработан с помощью инструментария системы управления обучением MOODLE.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. показано, что при помощи модульной технологии разработан специализированный дистанционный курс, охватывающий ключевые аспекты физики и технологии наноструктур из квантовых метаматериалов,
2. разработанный дистанционный курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов готов к использованию в образовательном процессе педагогического университета на педагогическом направлении подготовки с профилями по физике и математике, или физике и информатике.

Задачи работы решены полностью.

Гипотеза научного исследования, заключающаяся в том, что если использовать теоретические модели физических процессов в квантовых точках и результаты численных расчётов физических характеристик квантовых точек в дистанционном курсе по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, то можно создать специализированный дистанционный курс, опирающийся на современные представления о физических свойствах наноструктур из квантовых метаматериалов, который повысит уровень компетенций обучающихся в области физики наноструктур из квантовых метаматериалов и упростит доступ к актуальным знаниям, подтверждена полностью.

Дистанционный курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов построен с использованием модульной технологии построения курса, что позволяет эффективно управлять темпом продвижения по курсу по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов и применять смешанную технологию в преподавании физики и технологии квантовых метаматериалов. Теоретические материалы курса систематизировали и актуализировали знания о квантовых метаматериалах. Курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов интегрирован в образовательные платформы педагогического университета и планируется к использованию в образовательных программах бакалавриата и специалитета.

Список использованных источников

1. Алтунин К. К., Колесова Т. А. Разработка элементов дистанционного курса по физической наноэлектронике в системе управления обучением MOODLE // Наука online. — 2022. — № 1 (18). — С. 88–112. — URL: https://elibrary.ru/dutumg.

2. Алтунин К. К., Шленкина Е. А. Разработка информационной системы поддержки изучения темы по оптике метаматериалов в составе курса по нанооптике // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 75–88. — URL: https://elibrary.ru/pticsm.

3. Алтунин К. К., Лебедев А. А. Разработка дистанционного курса по нанофизике в системе управления обучением MOODLE // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 60–74. — URL: https://elibrary.ru/mpcxsb.

4. Алтунин К. К., Сорокина Е. О. Разработка материалов занятия по оптике нанокомпозитных материалов в курсе по оптике тонкослойных и наноструктурных покрытий // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 18–30. — URL: https://elibrary.ru/wgfhkb.

5. Алтунин К. К. Разработка компьютерного сопровождения изучения темы по спайзерам в курсе нанооптики // Наука online. — 2018. — № 4 (5). — С. 74–93. — URL: https://elibrary.ru/pvxfxn.

6. Алтунин К. К., Петрова Е. А. Разработка модульной структуры дистнционного курса «Оптика метаматериалов» в системе управления обучением MOODLE // Наука online. — 2019. — № 1 (6). — С. 50–70. — URL: https://elibrary.ru/pgpsft.

7. Алтунин К. К., Карташова А. А. Разработка электронного образовательного ресурса по солнечной энергетике // Наука online. — 2019. — № 2 (7). — С. 15–32. — URL: https://elibrary.ru/omnoyk.

8. Тимченко В. М. Проектирование дистанционного курса по физике мезоскопических систем // Наука online. — 2023. — № 4 (25). — С. 80–90. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/01/04252023-005.pdf.

9. Илюшкина Е. А. Разработка дистанционного курса по радиотехническим устройствам в школе // Наука online. — 2024. — № 4 (29). — С. 60–72. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/12/04292024-006.pdf.

10. Павлова Е. С. Разработка дистанционного курса по квантовым точкам // Наука online. — 2025. — № 4 (33). — С. 1–21. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/12/04332025-001.pdf.

Сведения об авторах:

Екатерина Сергеевна Павлова — студент факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: kat.pavlova2003@icloud.com

ORCID iD 0009-0009-1344-1431

Web of Science ResearcherID ISA-2133-2023

Original article
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 78A10

Pedagogical design of a distance learning course on quantum optics of nanostructures from quantum metamaterials in the learning management system MOODLE

E. S. Pavlova

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted May 11, 2026
Resubmitted May 12, 2026
Published June 30, 2026

Abstract. The development process of a distance learning course covering key aspects of metamaterial physics is described. This distance learning course on quantum optics of quantum metamaterial nanostructures was developed using the learning management system MOODLE. Using modular technology, a specialized distance learning course was developed covering key aspects of the physics and technology of quantum metamaterial nanostructures. This distance learning course on quantum optics of quantum metamaterial nanostructures was designed using modular course design technology, enabling effective pace management and the application of blended technology in teaching the physics and technology of quantum metamaterials. The theoretical materials of the course systematized and updated knowledge about quantum metamaterials. This course on quantum optics of quantum metamaterial nanostructures has been integrated into the educational platforms of the pedagogical university and is planned for use in undergraduate and specialist degree programs.

Keywords: course, distance learning course, quantum optics, nanostructure optics, metamaterial, modular technology, learning management system

References

1. Altunin K. K., Kolesova T. A. Development of distance learning course elements on physical nanoelectronics in the learning management system MOODLE // Science online. — 2022. — no. 1 (18). — P. 88–112. — URL: https://elibrary.ru/dutumg.

2. Altunin K. K., Shlenkina E. A. Development of an information system to support the study of the topic of metamaterial optics as part of a course on nanooptics // Science online. — 2022. — no. 2 (19). — P. 75–88. — URL: https://elibrary.ru/pticsm.

3. Altunin K. K., Lebedev A. A. Development of a distance learning course on nanophysics in the learning management system MOODLE // Science online. — 2022. — no. 2 (19). — P. 60–74. — URL: https://elibrary.ru/mpcxsb.

4. Altunin K. K., Sorokina E. O. Development of lesson materials on the optics of nanocomposite materials in a course on the optics of thin-film and nanostructured coatings // Science online. — 2022. — no. 2 (19). — P. 18–30. — URL: https://elibrary.ru/wgfhkb.

5. Altunin K. K. Development of computer support for studying the topic of spasers in a nanooptics course // Science online. — 2018. — no. 4 (5). — P. 74–93. — URL: https://elibrary.ru/pvxfxn.

6. Altunin K. K., Petrova E. A. Development of a modular structure for the distance learning course "Optics of metamaterials" in the learning management system MOODLE // Science online. — 2019. — no. 1 (6). — P. 50–70. — URL: https://elibrary.ru/pgpsft.

7. Altunin K. K., Kartashova A. A. Development of an electronic educational resource on solar energy // Science online. — 2019. — no. 2 (7). — P. 15–32. — URL: https://elibrary.ru/omnoyk.

8. Timchenko V. M. Designing a distance learning course on the physics of mesoscopic systems // Science online. — 2023. — no. 4 (25). — P. 80–90. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/01/04252023-005.pdf.

9. Ilyushkina E. A. Development of a distance learning course on radio-engineering devices at school // Science online. — 2024. — no. 4 (29). — P. 60–72. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/12/04292024-006.pdf.

10. Pavlova E. S. Development of a distance learning course on quantum dots // Science online. — 2025. — no. 4 (33). — P. 1–21. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/12/04332025-001.pdf.

Information about authors:

Ekaterina Sergeevna Pavlova — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ulyanovsk State Pedagogical University", Ulyanovsk, Russia.

E-mail: kat.pavlova2003@icloud.com

ORCID iD 0009-0009-1344-1431

Web of Science ResearcherID ISA-2133-2023