Научная статья
УДК 372.853
ББК 74.48
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Разработка дистанционного курса топологической фотоники

Э. А. Юсифова [1]

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432000, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 16 июля 2026 года
После переработки 17 июля 2026 года
Опубликована 30 сентября 2026 года

Аннотация. Представлены результаты разработки дистанционного курса топологической фотоники в системе управления обучением MOODLE. Целью работы является описание процесса разработки дистанционного курса топологической фотоники, который будет способствовать повышению уровня знаний студентов по фотонике, качества образования и развития навыков студентов университета в области нанооптики, фотоники и нанотехнологий. Дистанционный курс по топологической фотонике предназначен для студентов, аспирантов и специалистов, интересующихся передовыми направлениями современной оптики и фотоники, связанными с топологическими фазами материи. Курс сочетает теоретическое обоснование ключевых концепций, практическое применение численных методов и мультифизических моделей, а также анализ актуальных технологических решений в области топологической оптоэлектроники.

Ключевые слова: фотоника, нанооптика, оптика, топологическая фотоника, курс, дистанционный курс, цифровизация образования

Введение

Современные вызовы образования требуют интеграции инновационных подходов, таких как топологическая фотоника, являющаяся областью современных технологий, где актуальность дистанционного обучения с использованием систем управления обучением (например, система управления обучением MOODLE) обусловлена потребностью в подготовке специалистов в условиях ограниченного доступа к высокотехнологичному оборудованию и географической распределённости учебных заведений. Развитие образовательных технологий ставит перед вузами задачу быстрого обновления образовательных программ, а дистанционные курсы в системе управления обучением MOODLE становятся ключевым инструментом для стандартизации знаний, обеспечения интерактивности (например, через виртуальные лаборатории) и адаптации к потребностям

[1]E-mail: alyana.ysifova@mail.ru

работодателей в области фотонных систем с топологической защитой. Эффективность обучения в условиях цифровизации образования зависит от качества интеграции научного контента с интерактивными элементами (модули симуляции, тесты на понимание топологических инвариантов), что система управления обучением MOODLE позволяет реализовать через плагины и мультимедийные ресурсы — именно поэтому разработка такого курса актуальна для повышения заинтересованности студентов и снижения отсева в физико-технических дисциплинах.

Топологическая фотоника является междисциплинарной областью на стыке физики конденсированного состояния, оптики и квантовой теории, изучающая распространение света в системах с топологическими защищёнными состояниями (например, в фотонных кристаллах или волноводах с нетривиальной топологией). В отличие от традиционной фотоники, где световые волны чувствительны к дефектам и рассеянию, топологические фотонные структуры обеспечивают устойчивую передачу сигналов благодаря защищённым каналам, аналогичным эффектам Холла или топологической изоляции в электронике. Ключевые концепции включают топологические инварианты (например, число Черна, индекс Уайтхеда), которые классифицируют материалы и определяют их оптические свойства, а также бесщелевые состояния на границах или дефектах, которые являются критически важными для создания компактных лазеров, сенсоров и квантовых вычислительных элементов. Практические приложения охватывают низкопороговые лазеры, волоконно-оптические сети, биофотонику (например, микроскопию с высоким контрастом) и квантовые технологии, включая топологические фотонные квантовые компьютеры, что делает область перспективной для решения задач в телекоммуникациях, медицине и информационных технологиях. Развитие топологической фотоники тесно связано с физическим материаловедением (например, использованием метаматериалов, фотонных кристаллов) и нанофотоникой, открывая возможности для создания невидимости, суперколлимационных пучков и гибридных квантово-классических систем.

Целью работы является описание процесса разработки дистанционного курса топологической фотоники, который будет способствовать повышению уровня знаний студентов по фотонике, качества образования и развития навыков студентов университета в области нанооптики, фотоники и нанотехнологий.

В соответствии с целью работы поставлены следующие задачи исследования:

1. написать обзор научных работ по топологической фотонике,
2. разработать модульную структуру и содержание дистанционного курса по топологической фотонике,
3. создать материалы для дистанционного курса, способствующие лучшему пониманию студентами современных концепций топологической фотоники,
4. создать задания и тесты для проверки знаний студентов по курсу топологической фотоники.

Объектом исследования является курс топологической фотоники. Предметом исследования является процесс разработки дистанционного курса топологической фотоники в системе управления обучением MOODLE.

В качестве методов исследования используются следующие методы: анализ существующих научных материалов по топологической фотонике, анализ существующих дистанционных курсов по топологической фотонике и физическим дисциплинам с использованием методов сравнительного анализа и экспертной оценки, методы разработки модульной структуры и содержания дистанционного курса по топологической фотонике с использованием методов системного анализа и проектирования на основе современных технологий обучения фотонике, методы создания интерактивных и мультимедийных материалов с использованием методов компьютерной графики, анимации

и видео, методы тестирования и оценки эффективности разработанного дистанционного курса топологической фотоники. В качестве материалов исследования используются учебники и учебные пособия по оптике и топологической фотонике для университетов, учебно-методические материалы по топологической фотонике, методические рекомендации по разработке дистанционных курсов, примеры успешных дистанционных курсов по топологической фотонике и смежным физико-техническим дисциплинам, компьютерные программы и инструменты для создания интерактивных и мультимедийных материалов по топологической фотонике.

Научная новизна исследования заключается в создании нового дистанционного курса топологической фотоники, учитывающего современные тенденции и требования к образованию физико-математического профиля, а также в применении инновационных методов и технологий для разработки дистанционного курса по топологической фотонике.

Гипотеза научного исследования состоит в том, что если применять элементы дистанционного обучения в курсе топологической фотоники, то можно построить эффективную систему подготовки, которая будет эффективной и привлекательной для аудитории, а дистанционный курс топологической фотоники имеет ряд преимуществ перед другими формами обучения.

Теоретическая значимость научного исследования заключается в систематизации и обобщении существующих подходов к разработке дистанционных курсов по топологической фотонике, а также в определении основных принципов и требований созданию дистанционных курсов по фотонике. Практическая значимость научного исследования состоит в возможности использования разработанного дистанционного курса топологической фотоники в образовательном процессе университетов, что позволит повысить качество образования по учебным дисциплинам в области физики и развить навыки студентов университетов.

Обзор литературы по топологической фотонике

Топологическая фотоника стала преобразующей парадигмой в современной оптике, обеспечивая надёжное управление светом благодаря топологически защищённым состояниям. Стремительная эволюция этой области за последнее десятилетие требует систематического обзора её ключевых теоретических основ, экспериментальных подтверждений и потенциальных приложений.

Топологические фотонные сенсоры стали прорывом в современной оптической сенсорике благодаря интеграции механизмов топологической защиты и локализации света, таких как топологические состояния, квазисвязанные состояния в континууме и плазмонные поляритоны Тамма. Эти устройства демонстрируют исключительную чувствительность и высокодобротные резонансы, что делает их идеальными для высокоточного мониторинга окружающей среды, биомедицинской диагностики и промышленных сенсорных приложений. В этом обзоре рассматриваются фундаментальные физические принципы и разнообразные архитектуры сенсоров, от датчиков показателя преломления и биосенсоров до газовых и тепловых сенсоров, с акцентом на их принципы работы и показатели производительности. В статье @auxrussian@auxenglish[1] также рассматриваются проблемы достижения сверхвысокой добротности в практических устройствах, ограничения многопараметрического зондирования и сложность проектирования. В статье [1] предлагается физически обоснованные решения для преодоления этих барьеров, такие как интеграция вейлевских полуметаллов, гетероструктур на основе графена и неэрмитовых фотонных систем. Это сравнительное исследование подчеркивает преобразующее влияние топологических фотонных сенсоров на достижение сверхчувствительного обнаружения в различных областях.

Датчики являются необходимыми устройствами первостепенной важности во многих областях применения, от мониторинга окружающей среды и биомедицинской диагностики до химического анализа [2–6]. Эти устройства воспринимают изменения в физической среде посредством взаимодействия со светом, что позволяет проводить точные измерения таких явлений, как интенсивность света, температура, давление и химический состав. Традиционные датчики, основанные на традиционных фотонных структурах, широко используются [7–15]. Тем не менее, чувствительность к дефектам, шумовые помехи и ограничения в производительности, возникающие на высоких уровнях точности, сдерживают их развитие в реальных условиях. Недавние достижения в области фотоники стимулировали значительные инновации в проектировании и функциональности датчиков, при этом интеграция топологической фотоники стала прорывом [16–30]. Основы топологической фотоники возникли в результате изучения топологических изоляторов в физике твердого тела [17, 20, 21, 31, 32]. Материалы топологических изоляторов характеризуются наличием изолирующих объемных мод и проводящих поверхностных состояний или мод, невосприимчивых к обратному рассеянию, даже при наличии примесей или дефектов [31].

Рассмотренная литература демонстрирует, что топологическая фотоника перешла от чисто теоретической концепции к зрелой экспериментальной области с чёткими прикладными путями. Ключевые достижения включают экспериментальную проверку фотонных топологических фаз, разработку надёжных лазеров и сенсоров, а также интеграцию с квантовыми излучателями. Для дистанционного курса эта литература обеспечивают прочную основу для лекций, моделирования и дискуссий. Анализ литературы показывает, что топологическая фотоника остаётся одной из наиболее динамично развивающихся областей современной физики конденсированного состояния и оптики. Однако существующие дистанционные образовательные курсы по этой тематике носят фрагментарный характер и требуют дополнительной структуризации.

Результаты разработки структуры дистанционного курса по топологической фотонике

Дистанционный курс по топологической фотонике предназначен для студентов, аспирантов и специалистов, интересующихся передовыми направлениями современной оптики и фотоники, связанными с топологическими фазами материи. Курс сочетает теоретическое обоснование ключевых концепций, практическое применение численных методов и мультифизических моделей, а также анализ актуальных технологических решений в области топологической оптоэлектроники. Общая трудоёмкость курса составляет 180 академических часов, что соответствует 5 зачётным единицам и распределяется равномерно по модулям для обеспечения глубокого и систематического усвоения материала.

Первая тема посвящена изучению основ топологической фотоники и волновой оптики. Вторая тема посвящена изучению топологических инвариантов в одномерных, двумерных и трёхмерных системах фотоники. Третья тема посвящена изучению симметрии и классификации топологических изоляторов света. Четвёртая тема посвящена изучению топологических фотонных кристаллов и решёток в фотонике. Пятая тема посвящена изучению краевых и поверхностных состояний в топологических фотонных системах. Шестая тема посвящена изучению топологических дефектов и домены в фотонике. Седьмая тема посвящена изучению нелинейной топологической фотоники. Восьмая тема посвящена изучению методов моделирования на языке программирования Python для топологических систем. Девятая тема посвящена изучению численных методов на основе метода конечных элементов во временной области и метода плоскостных волн для моделирования распространения света в топологических структурах. Десятая тема

посвящена изучению квантовомеханических подходов для описания топологии квантовых оптических систем. Одиннадцатая тема посвящена изучению мультифизического моделирования топологических систем с учётом потерь и рассеяния. Двенадцатая тема посвящена изучению топологических фотонных устройств. Тринадцатая тема посвящена изучению топологических лазеров и усилителей для применения в оптоэлектронике. Четырнадцатая тема посвящена изучению топологической сенсорики и метрологии. Пятнаядцатая тема посвящена изучению использования языков программирования и прикладных программ для моделирования в топологической фотонике.

Начальным этапом курса служит введение в топологическую фотонику, где обучающиеся знакомятся с историей возникновения и актуальными тенденциями этого научного направления. Особое внимание уделяется физическим основам волновой оптики, включая принципы распространения электромагнитных волн в линейных и нелинейных средах, что создаёт базовый фундамент для понимания последующих разделов. Таким образом, студенты получают необходимые знания о природе световых полей и взаимодействии света с материалами, что становится основой для анализа топологических эффектов.

Далее в дистанционном курсе подробно рассматриваются топологические инварианты, которые определяют устойчивость краевых состояний в одномерных, двумерных и трёхмерных фотонных системах. Эту тему дополняют вопросы симметрий и классификации топологических изоляторов света, где студенты изучают групповые теории, зонную теорию, позволяющие описывать топологические фазы в различных пространственных конфигурациях. Понимание этих концепций критически важно для проектирования устойчивых фотонных структур, способных сохранять свои свойства при наличии дефектов или внешних возмущений.

В последующих модулях курс переходит к изучению топологических фотонных кристаллов и решёток, где рассматриваются периодические структуры, обладающие уникальными транспортными свойствами света. Здесь большое внимание уделяется краевым и поверхностным состояниям, которые возникают в таких системах и обеспечивают локализованное распространение света вдоль границ. Эти состояния играют ключевую роль в разработке топологически защищённых волноводов и устройств обработки информации на основе света. Анализ топологических дефектов и доменов позволяет обучающимся оценивать влияние нарушений периодичности на функциональность фотонных систем и разрабатывать методы их компенсации или использования в практических приложениях.

Особое место в курсе занимают нелинейные эффекты в топологических фотонных структурах, которые расширяют возможности управления светом за счёт нелинейных оптических взаимодействий. Этот раздел готовит студентов к анализу современных исследований в области нелинейной топологической фотоники, включая генерацию солитонов, бистабильность и нелинейные краевые состояния. Подобные знания необходимы для разработки адаптивных оптических устройств с динамическим управлением параметрами.

Практическая часть курса включает изучение численных методов и программных инструментов для моделирования топологических систем. Студенты осваивают основы программирования на Python для решения задач фотоники, включая реализацию алгоритмов моделирования распространения света в топологических структурах. Затем рассматриваются более сложные методы, такие как метод конечных элементов во временной области и метод плоскостных волн, которые позволяют учитывать сложные граничные условия и дисперсионные эффекты. Эти навыки формируют основу для проведения самостоятельных исследований и разработки собственных моделей.

Квантовомеханические аспекты топологических систем представляют отдельный

блок курса, где студенты знакомятся с подходами, основанными на теории представлений, топологических инвариантах в контексте квантовой механики и взаимодействии света с квантовыми состояниями. Этот материал тесно связан с мультифизическим моделированием, где изучаются потери, рассеяние и другие факторы, влияющие на реальные оптические системы. Комплексное моделирование с использованием инструментов, таких как Python, R и COMSOL, позволяет обучающимся учитывать множество физических эффектов одновременно, что является необходимым условием для разработки современных оптоэлектронных устройств.

В завершающих модулях курса рассматриваются конкретные приложения топологической фотоники, такие как топологические лазеры и усилители, устройства для сенсорики и метрологии, а также комбинированные системы с использованием различных инструментов моделирования. Здесь студенты анализируют примеры реальных устройств, разрабатывают собственные проекты и учатся оценивать их перспективы. Особое внимание уделяется интеграции теоретических знаний и практических навыков для решения актуальных задач в области оптоэлектроники и квантовых технологий.

Таким образом, курс топологической фотоники обеспечивает комплексное понимание современных научных и инженерных аспектов этого динамично развивающегося направления. Структура курса построена так, чтобы студенты могли постепенно переходить от фундаментальных основ к передовым методам моделирования и практическому применению, что способствует формированию профессиональных компетенций для научной и инженерной деятельности в области фотоники и оптоэлектроники.

Результаты разработки материалов дистанционного курса по топологической фотонике

Первым этапом педагогического проектирования является чёткое определение целей и задач курса, а также его целевой аудитории. Дистанционный курс ориентирован на студентов старших курсов, аспирантов и молодых исследователей в области фотоники, оптико-электронных систем и теоретической физики, которые готовы изучать передовые направления топологической оптики. На этом этапе необходимо проанализировать уровень предварительной подготовки участников, включая знания в области волновой оптики, квантовых систем и численных методов, чтобы адаптировать сложность материала и подобрать соответствующие форматы обучения. Поскольку курс требует интеграции теоретических и практических знаний, необходимо убедиться, что у аудитории есть базовые навыки программирования и работы с математическим обеспечением, что позволит эффективно освоить инструменты моделирования.

Следующим шагом является сопоставление содержания курса с образовательными стандартами и профессиональными компетенциями, которые требуются в современной науке и инженерии. Топологическая фотоника является междисциплинарным направлением, поэтому необходимо выделить ключевые компетенции, такие как понимание топологических фаз в фотонных системах, умение применять численные методы для моделирования оптических структур и анализ экспериментальных данных. На этом этапе важно определить, какие конкретно знания и навыки будут сформированы у обучающихся: от базовых принципов топологической защиты до практического проектирования устройств. Это позволит сформулировать логику построения тем и модулей курса, обеспечивая постепенное усложнение материала и формирование комплексных компетенций.

После определения компетенций необходимо разработать тематический план курса с учётом педагогической последовательности и логики усвоения материала. Курс начинается с введения в топологическую фотонику и физических основ волновой оптики, что создаёт фундамент для понимания последующих тем. Постепенно вводятся более

сложные концепции, такие как топологические инварианты, симметрии и классификация фотонных систем, что позволяет студентам постепенно наращивать глубину знаний. Особое внимание уделяется практико-ориентированным модулям, где изучаются методы моделирования и мультифизическое проектирование, что готовит обучающихся к решению реальных задач. Такая структура обеспечивает постепенный переход от теории к практике, а также позволяет интегрировать знания из разных областей, таких как квантовая механика, нелинейная оптика и вычислительные методы.

Поскольку курс рассчитан на 180 академических часов, необходимо распределить учебное время таким образом, чтобы каждый модуль содержал как теоретическую, так и практическую части, обеспечивая сбалансированную нагрузку. Например, модули по топологическим инвариантам и фотонным кристаллам должны включать не только лекционный материал, но и задания для самостоятельного изучения, а также практические упражнения по моделированию. Важно также предусмотреть временные резервы для обсуждения сложных тем, консультаций и самостоятельной работы. Модульная структура позволяет обучающимся гибко планировать своё время, что особенно актуально для дистанционного формата, где студенты могут совмещать учебу с другими обязанностями. Кроме того, модули можно адаптировать под индивидуальные темпы освоения материала.

В дистанционном формате важно использовать разнообразные интерактивные элементы для поддержания мотивации и вовлечённости обучающихся. Это могут быть вебинары с экспертами отрасли, обсуждения в дискуссионных форумах, групповые проекты и индивидуальные задания с обратной связью. Особое внимание следует уделить практическим занятиям, где студенты будут применять теоретические знания на практике, например, моделируя распространение света в топологических структурах с помощью Python или COMSOL. Также полезно включать интерактивные задачники, где студенты могут самостоятельно решать задачи и проверять свои знания с помощью автоматизированных систем. Это не только повышает эффективность обучения, но и помогает выявить пробелы в знаниях на ранних стадиях.

На этом этапе необходимо разработать систему оценки, которая будет адекватно отражать уровень усвоения материала и формирование компетенций. Она должна включать не только традиционные формы контроля, такие как тесты и экзаменационные работы, но и более сложные задания, такие как разработка проектов по моделированию топологических устройств или написание рефератов по актуальным исследованиям в области топологической фотоники. Важно также предусмотреть промежуточные аттестации, которые позволят студентам оценивать свой прогресс и корректировать стратегию обучения. Для дистанционного формата удобно использовать автоматизированные платформы для проведения тестирования и оценки практических работ, что снижает нагрузку на преподавателей и обеспечивает объективность результатов.

Разработка учебно-методического обеспечения является одним из ключевых этапов проектирования курса. Необходимо подготовить подробные конспекты лекций, слайды для вебинаров, практическое руководство по выполнению лабораторных работ и заданий, а также список рекомендуемой литературы, включая основные научные статьи, учебники и ресурсы в открытом доступе. Особенно важно обеспечить доступ к специализированному программному обеспечению для моделирования, такому как Python, COMSOL или R, предоставив студентам инструкции по установке и настройке инструментов. Кроме того, полезно разработать шаблоны для оформления отчетов и презентаций, что поможет студентам структурировать свою работу и сэкономить время на форматирование.

Практическая часть курса должна быть тесно интегрирована с теоретическим материалом и включать выполнение лабораторных работ по моделированию топологических

систем. Например, студенты могут изучать метод конечных элементов во временной области (FDTD) и метод плоскостных волн при решении задач распространения света в фотонных кристаллах. Для этого необходимо разработать пошаговые инструкции, примеры кода на Python, а также задания с возрастающей сложностью, позволяющие студентам отработать навыки программирования и анализа данных. Важно также предусмотреть консультационную поддержку для помощи в решении технических проблем, возникающих при выполнении практических работ. Это поможет студентам не только закрепить теоретические знания, но и развить навыки самостоятельной работы с современными инструментами моделирования.

В дистанционном обучении особое значение имеет система сопровождения и поддержки студентов. Необходимо предусмотреть несколько каналов обратной связи, таких как форумы, чаты, электронная почта и личные консультации в виде вебинаров. Важно также создать сообщество обучающихся, где студенты могли бы делиться опытом, обсуждать сложные вопросы и совместными усилиями решать практические задачи. Кроме того, преподаватели должны быть готовы оперативно отвечать на вопросы и предоставлять индивидуальную помощь тем, кто испытывает трудности с освоением материала. Регулярные опросы и обратная связь от студентов помогут выявить проблемные моменты и своевременно скорректировать учебный процесс.

Перед официальным запуском курса целесообразно провести его пилотное тестирование с небольшой группой студентов или экспертов. Это позволит выявить потенциальные сложности в структуре курса, недостатки в методическом обеспечении и проблемы с технической реализацией. На основе результатов пилотного тестирования можно внести необходимые коррективы, такие как переработка некоторых лекций, уточнение заданий или доработка инструкций по выполнению практических работ. Также важно собрать обратную связь от участников пилотной группы и использовать её для окончательной оптимизации курса перед запуском в массовом режиме. Это поможет повысить качество обучения и удовлетворенность студентов.

После завершения проектирования и пилотного тестирования необходимо организовать официальный запуск курса. Это включает настройку платформы обучения (например, системы управления обучением MOODLE), загрузку всех необходимых материалов, настройку систем оценки и коммуникации. Важно также разработать график проведения занятий, включая вебинары, семинары и консультации, и информировать студентов о сроках выполнения заданий и промежуточных аттестаций. В процессе обучения необходимо обеспечивать постоянную поддержку как технического, так и методического характера, чтобы студенты могли сосредоточиться на изучении материала. Также полезно проводить промежуточные анализы успеваемости и корректировать учебный план в случае необходимости.

В завершении обучения важно провести анализ его результатов, оценив уровень усвоения материала студентами, эффективность использованных методов оценивания обучающихся. Это может быть сделано с помощью анкетирования, анализа выполненных заданий и итоговых аттестаций. На основе собранной информации можно определить сильные и слабые стороны курса, а также выработать рекомендации по его дальнейшему развитию. Возможно, потребуется обновление учебных материалов, добавление новых тем или внедрение современных цифровых инструментов. Также полезно рассмотреть возможность расширения курса или создания дополнительных модулей для углублённого изучения отдельных аспектов топологической фотоники, что позволит сделать его более гибким и адаптивным к потребностям современной науки.

Таким образом, педагогическое проектирование дистанционного курса топологической фотоники представляет собой комплексный процесс, включающий этапы от определения образовательных целей и структурирования материала до организации под-

держки обучающихся и анализа результатов. Этот подход позволяет создать курс, который будет не только информативно насыщенным, но и доступным, удобным для освоения и актуальным для современных потребностей науки и индустрии.

Первая лекция посвящена изучению основ топологической фотоники и волновой оптики. Вторая лекция посвящена изучению топологических инвариантов в одномерных, двумерных и трёхмерных системах фотоники. Третья лекция посвящена изучению симметрии и классификации топологических изоляторов света. Четвёртая лекция посвящена изучению топологических фотонных кристаллов и решёток в фотонике. Пятая лекция посвящена изучению краевых и поверхностных состояний в топологических фотонных системах. Шестая лекция посвящена изучению топологических дефектов и домены в фотонике. Седьмая лекция посвящена изучению нелинейной топологической фотоники. Восьмая лекция посвящена изучению методов моделирования на языке программирования Python для топологических систем. Девятая лекция посвящена изучению численных методов на основе метода конечных элементов во временной области и метода плоскостных волн для моделирования распространения света в топологических структурах. Десятая лекция посвящена изучению квантовомеханических подходов для описания топологии квантовых оптических систем. Одиннадцатая лекция посвящена изучению мультифизического моделирования топологических систем с учётом потерь и рассеяния. Двенадцатая лекция посвящена изучению топологических фотонных устройств. Тринадцатая лекция посвящена изучению топологических лазеров и усилителей для применения в оптоэлектронике. Четырнадцатая лекция посвящена изучению топологической сенсорики и метрологии. Пятнадцатая лекция посвящена изучению использования языков программирования и прикладных программ для моделирования в топологической фотонике.

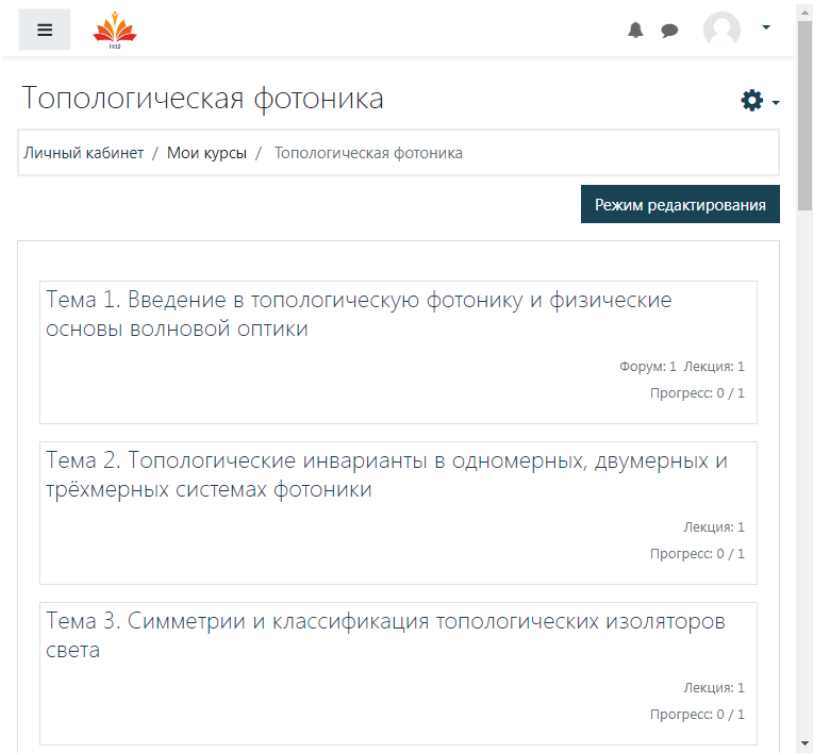


Рис. 1. Страница тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 1 приведено изображение страницы тематических модулей первой зачётной

единицы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

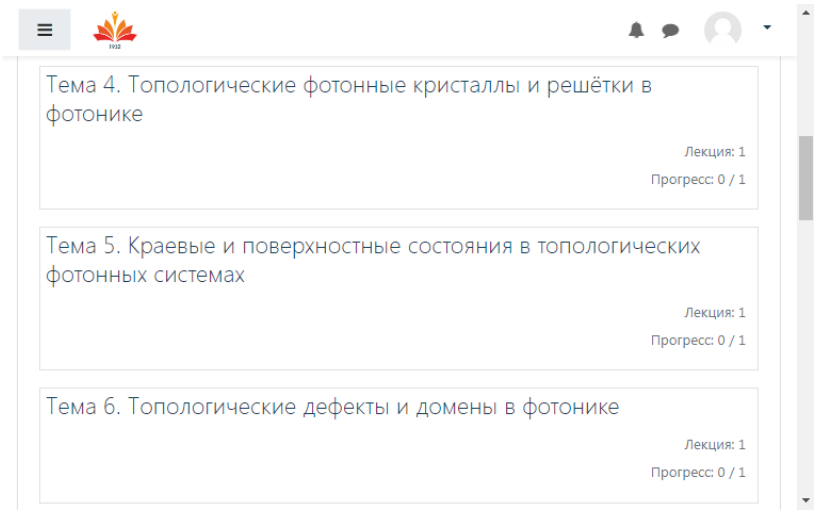


Рис. 2. Страница тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

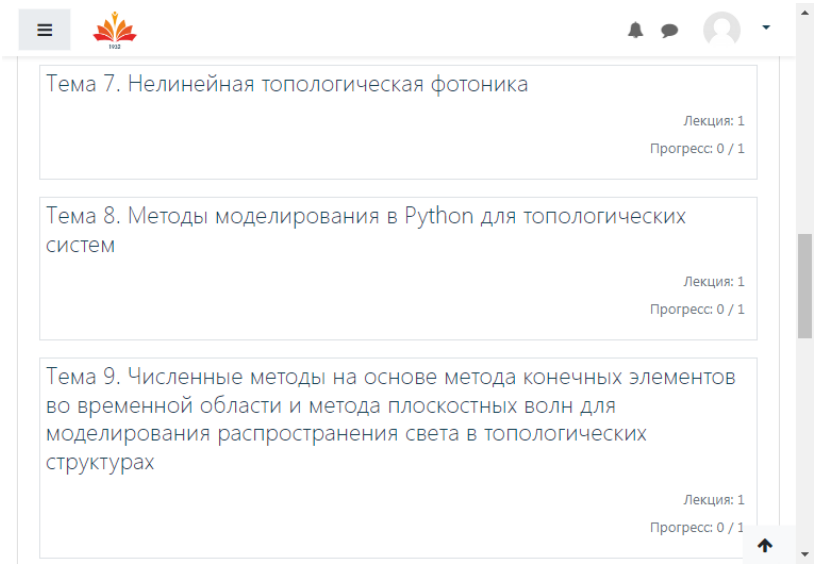


Рис. 3. Страница тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 приведено изображение страницы тематических модулей третьей зачётной единицы курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение страницы тематических модулей четвёртой зачётной единицы курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

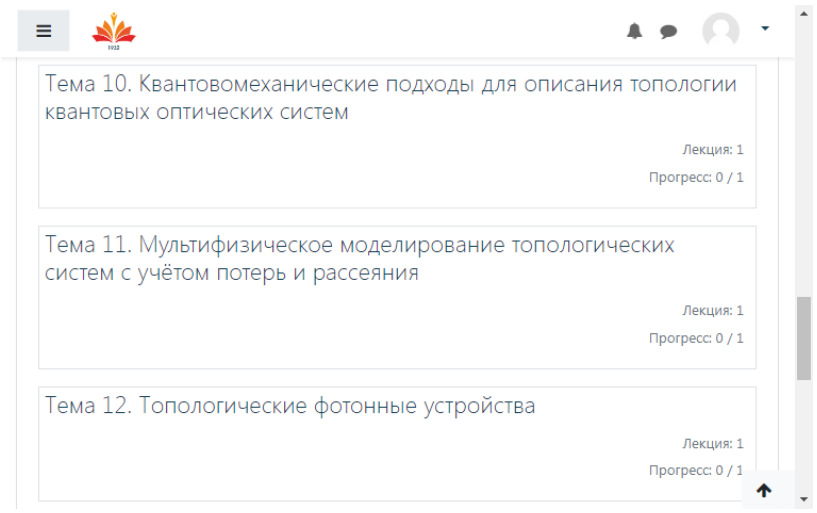


Рис. 4. Страница тематических модулей четвёртой зачётной единицы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

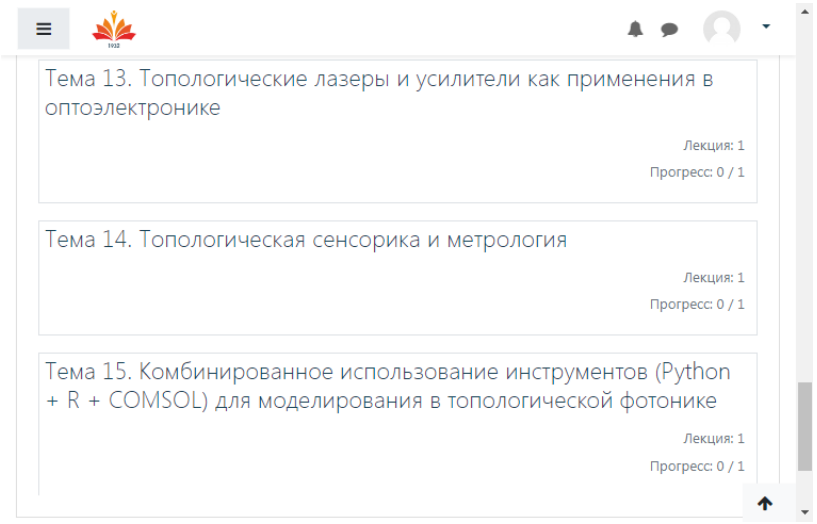


Рис. 5. Страница тематических модулей пятой зачётной единицы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 5 приведено изображение страницы тематических модулей пятой зачётной единицы курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 6 приведено изображение страницы элементов первой темы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

В процессе разработки и педагогического проектирования курса по топологической фотонике в системе MOODLE была сформирована комплексная образовательная структура, интегрирующая теоретические основы, современные инструменты моделирования и практико-ориентированные задачи, что позволило не только обеспечить глубинное освоение междисциплинарного материала, но и создать адаптивную и гибкую среду обучения для студентов и исследователей разного уровня подготовки.

Одним из ключевых выводов является высокий уровень междисциплинарности курса, который объединил физику конденсированного состояния, волновую оптику, кван-

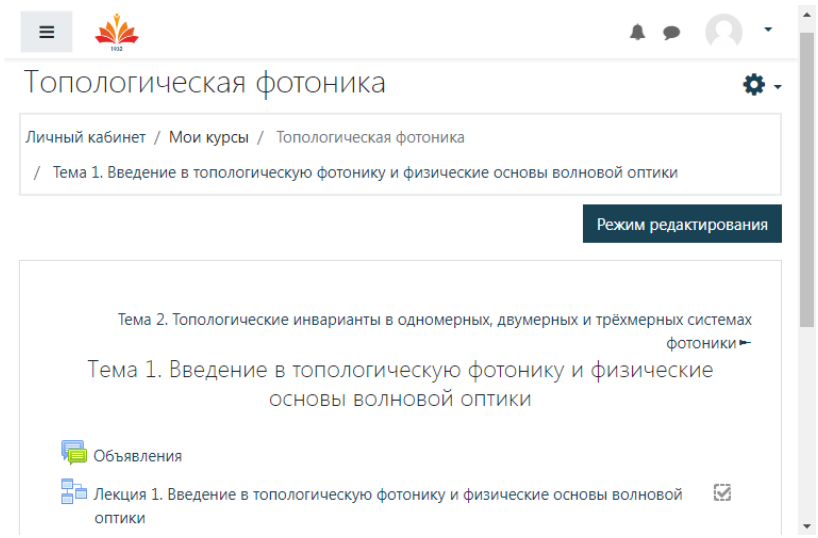


Рис. 6. Страница элементов первой темы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

товую оптику, численное моделирование и квантовую механику. Такая интеграция позволила студентам сформировать системное понимание топологических эффектов в фотонике, а не фрагментарные знания, что особенно важно для успешной работы в современных исследовательских коллективах и при разработке инновационных оптоэлектронных устройств.

Важной особенностью дистанционного курса топологической фотоники стало сбалансированное распределение учебной нагрузки, учитывающее как теоретическую, так и практическую составляющие. Тематика была структурирована таким образом, что каждая новая тема логично вытекала из предыдущей, начиная с вводных понятий волновой оптики и заканчивая актуальными приложениями топологической фотоники в сенсорике и оптоэлектронике. Этот подход обеспечивает постепенное наращивание сложности, что снижает риск перегрузки студентов и способствует более глубокому усвоению материала.

Особое внимание в процессе проектирования уделялось интерактивности и вовлечённости обучающихся, что стало возможным благодаря использованию интерактивных элементов в системе управления обучением MOODLE, таких как обсуждения в форумах, групповой анализ научных статей, а также выполнение практических заданий с обратной связью. Такой формат не только повысил мотивацию студентов, но и создал условия для активного взаимодействия как между обучающимися, так и между преподавателями и студентами, что особенно важно в дистанционном режиме.

Ещё одним значимым результатом стало внедрение современных инструментов моделирования на основе языков программирования Python и R, программного пакета COMSOL, что позволило студентам не только изучить теоретические концепции, но и применить их на практике. Практические занятия с использованием численных методов, таких как метод конечных элементов во временной области и метод плоскостных волн, обеспечили студентам возможность решать реальные задачи оптимизации фотонных структур, что приблизило учебный процесс к современным научным и инженерным практикам.

В ходе проектирования был также решен вопрос модульности и гибкости учебного процесса, что позволило студентам самостоятельно планировать время для изучения материала. Модульная структура курса даёт возможность адаптировать темпы обуче-

ния под индивидуальные особенности студентов, что особенно актуально для дистанционного формата. Кроме того, такая организация обучения позволяет вносить коррективы в учебный план на основе промежуточных оценок и обратной связи от студентов.

Особое внимание было уделено формированию компетенций в области мультифизического моделирования, что стало одним из инновационных аспектов курса. Комбинированное использование языка программирования Python для алгоритмического моделирования, языка программирования R для статистического анализа и программного пакета COMSOL для симуляций методом конечных элементов во временной области расширило горизонты студентов в области применения современных инструментов и подготовило их к работе в условиях, где требуется интеграция разных подходов для решения сложных задач.

Важно отметить, что в процессе разработки был проведён пилотный тест курса, который позволил выявить сильные и слабые стороны учебного материала, а также скорректировать формат подачи информации. Результаты пилотирования подтвердили эффективность выбранной структуры курса и показали, что студенты успешно осваивают как теоретические аспекты топологической фотоники, так и практические навыки моделирования.

Другой значимой особенностью курса стало создание практической ориентации, что проявилось в разработке тем, посвящённых реальным приложениям топологической фотоники, таким как топологические лазеры, сенсорика и усилители. Такое направление обучения не только расширило представление студентов о возможностях применения топологических структур, но и стимулировало развитие творческого мышления и способности к разработке инновационных решений.

Ещё одним важным моментом стало развитие навыков самостоятельной работы и критического мышления, что стало возможным благодаря использованию научных статей, обсуждению актуальных исследований в области топологической фотоники и выполнению заданий на анализ экспериментальных данных. Такие задачи способствуют не только углублению теоретических знаний, но и формированию умения оценивать научную информацию, формулировать гипотезы и разрабатывать экспериментальные планы.

Процесс проектирования курса также выявил необходимость постоянного обновления содержательной части в связи с быстрым развитием топологической фотоники. Это означает, что курс должен быть готов к динамическому внесению новых тем и методов, что позволит поддерживать актуальность учебного материала и соответствие современным научным тенденциям развития.

Наконец, важным итогом стало формирование профессионального сообщества вокруг курса, где студенты и преподаватели активно взаимодействуют, делятся опытом и поддерживают друг друга. Такой подход не только повышает эффективность обучения, но и способствует развитию научной коммуникации, что является важным фактором для будущих исследователей и инженеров.

Таким образом, курс по топологической фотонике в системе управления обучением MOODLE не только обеспечивает углублённое освоение теоретических и прикладных аспектов топологической оптики, но и создаёт условия для развития комплексных компетенций, необходимых для успешной научной и инженерной деятельности в современной фотонной индустрии. Этот опыт может быть использован как основа для дальнейшего развития дистанционных образовательных программ в области передовых технологий.

Заключение

Разработка дистанционного курса по топологической фотонике в университете является важным шагом в обеспечении доступности качественного образования в области оптики наноструктур, фотоники и нанотехнологий. Полученные результаты свидетельствуют о несомненной пользе курса топологической фотоники для студентов университетов, обучающихся на педагогических специальностях физико-математического профиля подготовки. Дистанционное обучение топологической фотонике является эффективным и привлекательным для студентов университетов, что подтверждается высоким интересом к курсу топологической фотоники. Курс топологической фотоники обладает рядом преимуществ перед другими формами обучения, такими как гибкость графика, доступность и возможность обучения в удобное время. Технология дистанционного обучения становится всё более популярной и востребованной образовательной технологией в условиях непрерывного развития современных образовательных технологий с учётом возможностей Интернета и видеоконференцсвязи. Технологии дистанционного обучения позволяют успешно использовать их для достижения высоких результатов в изучении топологической фотоники.

Выводы по исследованию можно сформулировать следующим образом:

1. написанный обзор научных работ по топологической фотонике показал актуальность темы исследования и позволил определить структуру дистанционного курса топологической фотоники в университете,
2. разработан и внедрён в практику вузовского обучения дистанционный курс по топологической фотонике, имеющий модульную структуру и достаточное наполнение содержанием,
3. созданные материалы для дистанционного курса топологической фотоники способствуют лучшему пониманию студентами современных концепций современной фотоники,
4. созданные задания и тесты позволяют проводить проверку знаний студентов по курсу топологической фотонике в условиях смешанного обучения или дистанционного обучения фотонике.

Задачи работы решены полностью.

Данное исследование имеет важное теоретическое значение, поскольку оно способствует развитию теории дистанционного обучения в области фотоники и нанотехнологий. Разработанный дистанционный курс топологической фотоники может быть использован в качестве основы для дальнейших исследований дистанционного обучения в области нанотехнологий. Теоретическая значимость исследования была реализована путём разработки дистанционного курса по топологической фотонике, который может быть использован в качестве основы для дальнейших исследований дистанционного обучения в области фотоники и нанотехнологий. Практическая значимость исследования была реализована путём создания эффективного дистанционного курса по топологической фотонике в системе управления обучением MOODLE, который будет способствовать повышению уровня знаний студентов по топологической фотонике и развитию навыков студентов университетов в области фотоники и нанотехнологий. Для обеспечения интерактивности обучения студентов на курсе топологической фотоники были задействованы современные образовательные технологии, такие как видеоуроки, интерактивные задания и тестирование знаний. Кроме того, была предусмотрена возможность консультаций с преподавателями курса и обратной связи для студентов.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если применять элементы дистанционного обучения в курсе топологической фотоники, то можно построить эффективную систему подготовки, которая будет эффективной и привлекательной для аудитории, а

дистанционный курс топологической фотоники имеет ряд преимуществ перед другими формами обучения, подтверждена полностью.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на улучшение дистанционного курса топологической фотоники путём внедрения новых интерактивных и мультимедийных материалов по топологической фотонике, а также на исследование эффективности дистанционного обучения в области фотоники и нанотехнологий. Дальнейшее развитие и совершенствование дистанционного курса топологической фотоники позволит не только расширить круг обучаемых, но и улучшить качество подготовки специалистов в области фотоники и нанотехнологий, что в перспективе способствует развитию современной фотоники.

Список использованных источников

1. Topological photonic crystal sensors: fundamental principles, recent advances, and emerging applications / Israa Abood [et al.] // Sensors. — 2025. — Feb. — Vol. 25, no. 5. — P. 1455. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/s25051455.

2. Recent advances in biomedical photonic sensors: a focus on optical-fibre-based sensing / Mario Ochoa [et al.] // Sensors. — 2021. — Sept. — Vol. 21, no. 19. — P. 6469. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/s21196469.

3. Topological sensor on a silicon chip / Abhishek Kumar [et al.] // Applied Physics Letters. — 2022. — July. — Vol. 121, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0097129.

4. Limonov Mikhail F. Fano resonance for applications // Advances in optics and photonics. — 2021. — Sept. — Vol. 13, no. 3. — P. 703. — URL: http://dx.doi.org/10.1364/AOP.420731.

5. Butt Muhammad Ali, Mateos Xavier, Piramidowicz Ryszard. Photonics sensors: a perspective on current advancements, emerging challenges, and potential solutions (Invited) // Physics Letters A. — 2024. — Aug. — Vol. 516. — P. 129633. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physleta.2024.129633.

6. Synthesis, characterization, and optical sensing of hydrophilic anodic alumina films / Alaa M. Abd-Elnaiem [et al.] // Optical materials. — 2024. — Nov. — Vol. 157. — P. 116390. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116390.

7. Nair Rajesh V., Vijaya R. Photonic crystal sensors: an overview // Progress in quantum electronics. — 2010. — May. — Vol. 34, no. 3. — P. 89–134. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.pquantelec.2010.01.001.

8. Zhang Ya-nan, Zhao Yong, Lv Ri-qing. A review for optical sensors based on photonic crystal cavities // Sensors and Actuators A: Physical. — 2015. — Sept. — Vol. 233. — P. 374–389. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.07.025.

9. Liu Y., Salemink H. W. M. Photonic crystal-based all-optical on-chip sensor // Optics express. — 2012. — Aug. — Vol. 20, no. 18. — P. 19912. — URL: http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.019912.

10. Elongated-hexagonal photonic crystal for buffering, sensing, and modulation / Sayed Elshahat [et al.] // Nanomaterials. — 2021. — Mar. — Vol. 11, no. 3. — P. 809. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/nano11030809.

11. Scullion Mark, Krauss Thomas, Di Falco Andrea. Slotted photonic crystal sensors // Sensors. — 2013. — Mar. — Vol. 13, no. 3. — P. 3675–3710. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/s130303675.

12. Abood Israa, Elshahat Sayed, Ouyang Zhengbiao. High figure of merit optical buffering in coupled-slot slab photonic crystal waveguide with ionic liquid // Nanomaterials. — 2020. — Sept. — Vol. 10, no. 9. — P. 1742. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/nano10091742.

13. Dispersion engineering of W2 steeple-house-defect waveguide photonic crystal / Sayed Elshahat [et al.] // Results in physics. — 2020. — Dec. — Vol. 19. — P. 103547. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103547.

14. Abood Israa, Elshahat Sayed, Ouyang Zhengbiao. High buffering capability of silicon-polymer photonic-crystal coupled cavity waveguide // Waves in random and complex media. — 2021. — Feb. — Vol. 33, no. 2. — P. 296–311. — URL: http://dx.doi.org/10.1080/17455030.2021.1879406.

15. Hou Jue, Li Mingzhu, Song Yanlin. Recent advances in colloidal photonic crystal sensors: materials, structures and analysis methods // Nano today. — 2018. — Oct. — Vol. 22. — P. 132–144. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.nantod.2018.08.008.

16. Jalali Mehrabad Mahmoud, Mittal Sunil, Hafezi Mohammad. Topological photonics: fundamental concepts, recent developments, and future directions // Physical Review A. — 2023. — Oct. — Vol. 108, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.108.040101.

17. Khanikaev Alexander B., Shvets Gennady. Two-dimensional topological photonics // Nature Photonics. — 2017. — Nov. — Vol. 11, no. 12. — P. 763–773. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41566-017-0048-5.

18. Slow light topological photonics with counter-propagating waves and its active control on a chip / Abhishek Kumar [et al.] // Nature communications. — 2024. — Jan. — Vol. 15, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41467-024-45175-5.

19. A brief review of topological photonics in one, two, and three dimensions / Zhihao Lan [et al.] // Reviews in physics. — 2022. — Dec. — Vol. 9. — P. 100076. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.revip.2022.100076.

20. On-chip topological nanophotonic devices / Cui-Cui Lu [et al.] // Chip. — 2022. — Dec. — Vol. 1, no. 4. — P. 100025. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.chip.2022.100025.

21. Pleasants Simon. Light needles in colloids // Nature photonics. — 2014. — Jan. — Vol. 8, no. 2. — P. 85–85. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2014.24.

22. Active topological photonics / Yasutomo Ota [et al.] // Nanophotonics. — 2020. — Jan. — Vol. 9, no. 3. — P. 547–567. — URL: http://dx.doi.org/10.1515/nanoph-2019-0376.

23. Topological photonics / Tomoki Ozawa [et al.] // Reviews of Modern Physics. — 2019. — Mar. — Vol. 91, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.91.015006.

24. Non-Hermitian and topological photonics: optics at an exceptional point / Midya Parto [et al.] // Nanophotonics. — 2020. — Oct. — Vol. 10, no. 1. — P. 403–423. — URL: http://dx.doi.org/10.1515/nanoph-2020-0434.

25. Roadmap on topological photonics / Hannah Price [et al.] // Journal of physics: photonics. — 2022. — June. — Vol. 4, no. 3. — P. 032501. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/2515-7647/ac4ee4.

26. The perspective of topological photonics for on-chip terahertz modulation and sensing / Yiwen Sun [et al.] // APL Photonics. — 2023. — Nov. — Vol. 8, no. 11. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0170233.

27. Hybrid topological photonic crystals / Yanan Wang [et al.] // Nature Communications. — 2023. — July. — Vol. 14, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41467-023-40172-6.

28. Applications of topological photonics in integrated photonic devices / You Wu [et al.] // Advanced Optical Materials. — 2017. — Aug. — Vol. 5, no. 18. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/adom.201700357.

29. Terahertz topological photonics for on-chip communication / Yihao Yang [et al.] // Nature Photonics. — 2020. — Apr. — Vol. 14, no. 7. — P. 446–451. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41566-020-0618-9.

30. Observation of gapless corner modes of photonic crystal slabs in synthetic translation dimensions / Wen-Jin Zhang [et al.] // Photonics Research. — 2024. — Feb. — Vol. 12, no. 3. — P. 444. — URL: http://dx.doi.org/10.1364/PRJ.506167.

31. Photonic topological insulators / Alexander B. Khanikaev [et al.] // Nature Materials. — 2012. — Dec. — Vol. 12, no. 3. — P. 233–239. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nmat3520.

32. Topological photonic crystals: a review / Hongfei Wang [et al.] // Frontiers of Optoelectronics. — 2020. — Jan. — Vol. 13, no. 1. — P. 50–72. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s12200-019-0949-7.

Сведения об авторах:

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

E-mail: alyana.ysifova@mail.ru

ORCID iD 0009-0005-6536-2082

Web of Science ResearcherID JRW-6185-2023

Original article
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Development of a distance learning course on topological photonics

E. A. Yusifova

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432000, Ulyanovsk, Russia

Submitted July 16, 2026
Resubmitted July 17, 2026
Published September 30, 2026

Abstract. The results of the development of a distance learning course on topological photonics in the learning management system MOODLE are presented. The objective is to describe the development process of a course designed to enhance students' knowledge of photonics and improve the quality of education, while fostering skills in nano-optics, photonics, and nanotechnology. The course targets undergraduate and graduate students, as well as professionals interested in cutting-edge areas of modern optics and photonics related to topological phases of matter. It combines the theoretical foundations of key concepts with the practical application of numerical methods and multiphysics models, alongside an analysis of current technological solutions in the field of topological optoelectronics.

Keywords: photonics, nano-optics, optics, topological photonics, course, distance learning course, digitalization of education

References

1. Topological photonic crystal sensors: fundamental principles, recent advances, and emerging applications / Israa Abood [et al.] // Sensors. — 2025. — Feb. — Vol. 25, no. 5. — P. 1455. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/s25051455.

2. Recent advances in biomedical photonic sensors: a focus on optical-fibre-based sensing / Mario Ochoa [et al.] // Sensors. — 2021. — Sept. — Vol. 21, no. 19. — P. 6469. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/s21196469.

3. Topological sensor on a silicon chip / Abhishek Kumar [et al.] // Applied Physics Letters. — 2022. — July. — Vol. 121, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0097129.

4. Limonov Mikhail F. Fano resonance for applications // Advances in optics and photonics. — 2021. — Sept. — Vol. 13, no. 3. — P. 703. — URL: http://dx.doi.org/10.1364/AOP.420731.

5. Butt Muhammad Ali, Mateos Xavier, Piramidowicz Ryszard. Photonics sensors: a perspective on current advancements, emerging challenges, and potential solutions (Invited) // Physics Letters A. — 2024. — Aug. — Vol. 516. — P. 129633. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physleta.2024.129633.

6. Synthesis, characterization, and optical sensing of hydrophilic anodic alumina films / Alaa M. Abd-Elnaiem [et al.] // Optical materials. — 2024. — Nov. — Vol. 157. — P. 116390. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116390.

7. Nair Rajesh V., Vijaya R. Photonic crystal sensors: an overview // Progress in quantum electronics. — 2010. — May. — Vol. 34, no. 3. — P. 89–134. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.pquantelec.2010.01.001.

8. Zhang Ya-nan, Zhao Yong, Lv Ri-qing. A review for optical sensors based on photonic crystal cavities // Sensors and Actuators A: Physical. — 2015. — Sept. — Vol. 233. — P. 374–389. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.07.025.

9. Liu Y., Salemink H. W. M. Photonic crystal-based all-optical on-chip sensor // Optics express. — 2012. — Aug. — Vol. 20, no. 18. — P. 19912. — URL: http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.019912.

10. Elongated-hexagonal photonic crystal for buffering, sensing, and modulation / Sayed Elshahat [et al.] // Nanomaterials. — 2021. — Mar. — Vol. 11, no. 3. — P. 809. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/nano11030809.

11. Scullion Mark, Krauss Thomas, Di Falco Andrea. Slotted photonic crystal sensors // Sensors. — 2013. — Mar. — Vol. 13, no. 3. — P. 3675–3710. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/s130303675.

12. Abood Israa, Elshahat Sayed, Ouyang Zhengbiao. High figure of merit optical buffering in coupled-slot slab photonic crystal waveguide with ionic liquid // Nanomaterials. — 2020. — Sept. — Vol. 10, no. 9. — P. 1742. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/nano10091742.

13. Dispersion engineering of W2 steeple-house-defect waveguide photonic crystal / Sayed Elshahat [et al.] // Results in physics. — 2020. — Dec. — Vol. 19. — P. 103547. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103547.

14. Abood Israa, Elshahat Sayed, Ouyang Zhengbiao. High buffering capability of silicon-polymer photonic-crystal coupled cavity waveguide // Waves in random and complex media. — 2021. — Feb. — Vol. 33, no. 2. — P. 296–311. — URL: http://dx.doi.org/10.1080/17455030.2021.1879406.

15. Hou Jue, Li Mingzhu, Song Yanlin. Recent advances in colloidal photonic crystal sensors: materials, structures and analysis methods // Nano today. — 2018. — Oct. — Vol. 22. — P. 132–144. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.nantod.2018.08.008.

16. Jalali Mehrabad Mahmoud, Mittal Sunil, Hafezi Mohammad. Topological photonics: fundamental concepts, recent developments, and future directions // Physical Review A. — 2023. — Oct. — Vol. 108, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.108.040101.

17. Khanikaev Alexander B., Shvets Gennady. Two-dimensional topological photonics // Nature Photonics. — 2017. — Nov. — Vol. 11, no. 12. — P. 763–773. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41566-017-0048-5.

18. Slow light topological photonics with counter-propagating waves and its active control on a chip / Abhishek Kumar [et al.] // Nature communications. — 2024. — Jan. — Vol. 15, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41467-024-45175-5.

19. A brief review of topological photonics in one, two, and three dimensions / Zhihao Lan [et al.] // Reviews in physics. — 2022. — Dec. — Vol. 9. — P. 100076. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.revip.2022.100076.

20. On-chip topological nanophotonic devices / Cui-Cui Lu [et al.] // Chip. — 2022. — Dec. — Vol. 1, no. 4. — P. 100025. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.chip.2022.100025.

21. Pleasants Simon. Light needles in colloids // Nature photonics. — 2014. — Jan. — Vol. 8, no. 2. — P. 85–85. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2014.24.

22. Active topological photonics / Yasutomo Ota [et al.] // Nanophotonics. — 2020. — Jan. — Vol. 9, no. 3. — P. 547–567. — URL: http://dx.doi.org/10.1515/nanoph-2019-0376.

23. Topological photonics / Tomoki Ozawa [et al.] // Reviews of Modern Physics. — 2019. — Mar. — Vol. 91, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.91.015006.

24. Non-Hermitian and topological photonics: optics at an exceptional point / Midya Parto [et al.] // Nanophotonics. — 2020. — Oct. — Vol. 10, no. 1. — P. 403–423. — URL: http://dx.doi.org/10.1515/nanoph-2020-0434.

25. Roadmap on topological photonics / Hannah Price [et al.] // Journal of physics: photonics. — 2022. — June. — Vol. 4, no. 3. — P. 032501. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/2515-7647/ac4ee4.

26. The perspective of topological photonics for on-chip terahertz modulation and sensing / Yiwen Sun [et al.] // APL Photonics. — 2023. — Nov. — Vol. 8, no. 11. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0170233.

27. Hybrid topological photonic crystals / Yanan Wang [et al.] // Nature Communications. — 2023. — July. — Vol. 14, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41467-023-40172-6.

28. Applications of topological photonics in integrated photonic devices / You Wu [et al.] // Advanced Optical Materials. — 2017. — Aug. — Vol. 5, no. 18. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/adom.201700357.

29. Terahertz topological photonics for on-chip communication / Yihao Yang [et al.] // Nature Photonics. — 2020. — Apr. — Vol. 14, no. 7. — P. 446–451. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41566-020-0618-9.

30. Observation of gapless corner modes of photonic crystal slabs in synthetic translation dimensions / Wen-Jin Zhang [et al.] // Photonics Research. — 2024. — Feb. — Vol. 12, no. 3. — P. 444. — URL: http://dx.doi.org/10.1364/PRJ.506167.

31. Photonic topological insulators / Alexander B. Khanikaev [et al.] // Nature Materials. — 2012. — Dec. — Vol. 12, no. 3. — P. 233–239. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nmat3520.

32. Topological photonic crystals: a review / Hongfei Wang [et al.] // Frontiers of Optoelectronics. — 2020. — Jan. — Vol. 13, no. 1. — P. 50–72. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s12200-019-0949-7.

Information about authors:

Elyana Akifovna Yusifova — 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: alyana.ysifova@mail.ru

ORCID iD 0009-0005-6536-2082

Web of Science ResearcherID JRW-6185-2023