

Научная статья
УДК 53.01
ББК 22.31
ГРНТИ 29.01.45
ВАК 01.04.15
PACS 01.40.Di
OCIS 240.5420
MSC 00A79

Разработка дистанционного курса по наноплазмонике графена

К. К. Алтунин , Е. Е. Волкова  ¹

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

Поступила в редакцию 16 мая 2023 года

После переработки 17 мая 2023 года

Опубликована 5 июня 2023 года

Аннотация. Описаны результаты разработки дистанционного курса по наноплазмонике графена в системе управления обучением MOODLE. Обсуждаются результаты разработки модульной структуры дистанционного курса по наноплазмонике графена в системе управления обучением MOODLE. Обсуждаются результаты разработки основных элементов дистанционного курса по наноплазмонике графена в системе управления обучением MOODLE. Обсуждаются результаты разработки элементов контроля знаний по курсу наноплазмоники графена в системе управления обучением MOODLE. Представлены результаты экспертной оценки дистанционного курса по наноплазмонике графена в системе управления обучением MOODLE.

Ключевые слова: наноплазмоника, графен, плазмон, нанокompозит, дистанционный курс, система управления обучением, элемент курса

Введение

Целью исследования является описание процесса разработки дистанционного курса «Наноплазмоника графена».

Задача исследования состоит в разработке модульной структуры и избранных элементов дистанционного курса по наноплазмонике графена, опирающийся на современные представления об оптических свойствах нанокompозитных структур графеновой наноплазмоники.

Объектом исследования является дистанционный курс «Наноплазмоника графена».

Предметом исследования является процесс создания информационных и контролируемых элементов дистанционного курса «Наноплазмоника графена» в системе управления обучением MOODLE.

Гипотеза исследования состоит в том, что если использовать дистанционный курс «Наноплазмоника графена» в системе управления обучением MOODLE, то можно оптимизировать процесс преподавания учебной дисциплины «Наноплазмоника графена».

¹E-mail: liza_volkova1999@mail.ru

Практическая значимость исследования заключается в том, что апробирован и внедрён в педагогическую практику университета дистанционный курс по наноплазмонике графена, созданный на основе теоретических материалов по наноплазмонике графена. Использование дистанционного курса по наноплазмонике графена открывает возможность реализации смешанного обучения по наноплазмонике графена в университетах.

Базой исследования дистанционного курса по наноплазмонике графена в системе управления обучением MOODLE является образовательный портал ФГБОУ ВО «УлГ-ПУ им. И. Н. Ульянова».

Обзор работ по наноплазмонике

Невзаимная плазмоника играет решающую роль в обеспечении одностороннего распространения света на наноуровне и является фундаментальным строительным блоком для современных фотонных приложений. В статье @auxrussian@auxenglish[1] исследуется внутренняя невзаимность в объёмной дисперсии плазмонов в системах, которые нарушают как чётность, так и симметрию обращения времени. В статье [1] оказано, что как межзонные, так и внутризонные объёмные плазмонные моды демонстрируют внутренне асимметричную дисперсию, зависящую от знака волнового вектора. Исследование, представленное в статье [1], показывает, что внутренняя невзаимность в межзонной дисперсии плазмонов определяется квантово-метрической связью. Невзаимность во внутризонной плазмонной дисперсии диктуется квантово-метрическим диполем и дурде-весоподобным членом более высокого порядка. Выводы подтверждены с помощью явных численных расчетов для двумерной модели Ци-Ву-Чжана и демонстрируем существование внутренних невзаимных внутризонных и межзонных плазмонных мод в муаровых системах, таких как скрученный двухслойный графен. Результаты предлагают понимание физики, лежащей в основе невзаимной плазмоники, и прокладывают путь к разработке новых фотонных устройств.

В статье [2] сообщается о настраиваемом – с помощью магнитного поля и напряжения на затворе – преобразовании терагерцового излучения в постоянный электрический ток в пространственно-модулированном двухслойном графене. В статье [2] экспериментально показано, что основная физика связана с так называемым эффектом храповика. Ключевыми выводами являются прямое наблюдение острого циклотронного резонанса в фототоке и демонстрация двух эффектов, вызванных электрон-электронным взаимодействием: плазмонного расщепления резонанса из-за дальнедействующей кулоновской связи и частичного подавления его второй гармоники из-за дальнедействующей кулоновской связи к быстрым межчастичным столкновениям. В статье [2] разрабатывается теория, которая идеально соответствует экспериментальным данным. В статье [2] утверждается, что храповой ток генерируется в гидродинамическом режиме неидеальной электронной жидкости.

Для реализации любого плазмонного устройства необходимо иметь инструмент для манипулирования поверхностными плазмон-поляритонами. Традиционный подход к активной плазмонике на основе благородных металлов основан на объединении плазмонных и оптически активных материалов [3–7]. Например, связь между магнитными и оптическими свойствами в магнитооптических материалах приводит к оптически индуцированным магнитным полям посредством обратного эффекта Фарадея [8–11] или усиленных магнитооптических эффектов из-за плазмонных возбуждений [12–19].

Полевой транзистор на основе графена был введён для генерации гибридной плазмонной моды. Основными причинами рассмотрения графена в этом исследовании являются достижение высокого удержания поля и транспортный канал графена с двумя носителями вблизи его точки зарядовой нейтральности. В статье [20] описаны результаты наблюдений нелинейного поведения гибридной плазмонной моды вблизи точки

зарядовой нейтральности графена из-за существования модели с двумя носителями. Это нелинейное поведение отражает внутренние наноэлектронные характеристики графена. Предлагаемое наноэлектронное устройство представляет собой перестраиваемую гибридную горячую точку сверхограниченного диапазона, площадь моды которой в 10^5 раз меньше площади пятна дифракционного ограничения. Причём эта площадь на три порядка меньше, чем модальная площадь аналогичной гибридной наноструктуры на основе металла. В статье [20] сообщается о такой наноразмерной трёхмерной горячей точке с плазмонно-фотонным характером. Кроме того, была численно исследована гибридная структура на основе двухслойного скрученного графена, которая обеспечивает сверхвысокое удержание и сверхбольшое расстояние распространения. Предлагаемое наноустройство может быть использовано для создания компактных интегральных схем, оптических нейронных сетей и датчиков высокого разрешения.

В статье [21] представлен численный подход для решения электромагнитного рассеяния от диэлектрического цилиндра, частично покрытого графеном. Он основан на классическом разложении Фурье-Бесселя полей внутри и снаружи цилиндра, к которому применяются специальные граничные условия в присутствии графена. Ввиду сингулярности электрического поля на краях листа графена введём вспомогательные граничные условия. Результатом является особенно простой и эффективный метод, позволяющий изучать дифракцию от таких структур. В статье [21] также подчеркивается наличие множественных плазмонных резонансов, которые можно приписать поверхностным модам цилиндра с покрытием.

В статье [22] сообщается о результатах исследования наномасштабных инфракрасных изображений и результатах спектроскопического исследования физических характеристик плазмонов горячих электронов в графене, которые возбуждаются острым металлическим зондом сканирующего оптического микроскопа ближнего поля рассеивающего типа, освещённого средним инфракрасным излучением. фемтосекундный импульсный лазер. В статье [22] обнаружено, что средняя температура электронов может достигать порядка 1400 К в течение длительности импульса, которую можно контролировать, настраивая мощность лазера. С помощью острия металлического зонда сканирующего оптического микроскопа ближнего поля рассеивающего типа отслеживали как интерференционные полосы плазмонов, так и гибридные плазмон-фононные резонансы графена. Когда графен сильно легирован, более высокое значение средней температуры электронов приводит к меньшей длине волны плазмона и более слабой интенсивности плазмон-фононного резонанса. С другой стороны, в точке зарядовой нейтральности интенсивность плазмон-фононного резонанса увеличивается при увеличении средней температуры электронов. С помощью количественного моделирования и теоретического анализа пришли к выводу, что наблюдаемые плазмонные отклики горячих электронов определяются температурными зависимостями химического потенциала, рассеяния электронов и генерации тепловых носителей. Конкуренция этих факторов приводит к отчетливой зависимости графеновых плазмонов от средней температуры электронов при различных уровнях легирования.

В статье [23] исследуются латеральные силы отдачи, действующие на наночастицы, расположенные вблизи плазмонных платформ, с взаимным откликом в плоскости. С этой целью сначала разрабатывается всеобъемлющая теоретическая основа, основанная на силе Лоренца в рамках приближения Рэля в сочетании с взаимными функциями Грина, а затем выводятся приближённые аналитические выражения для моделирования боковых сил отдачи, демонстрируя их явную зависимость от закона дисперсии системы и раскрывая механизмы, которые ими управляют. В частности, доминирующая боковая составляющая сил отдачи возникает из-за дисбаланса импульсов взаимных поверхностных плазмонов, поддерживаемых платформой. Эта сила может быть

на несколько порядков больше, чем другие компоненты силы отдачи, действует только вдоль или против направления внешнего смещения и практически не зависит от направления, поляризации и длины волны падающей плоской волны. Боковые силы отдачи исследуются с использованием графеновых метаповерхностей с дрейфом, платформы, которая также предлагается для сортировки наночастиц в зависимости от их размера. Невзаимные плазмонные системы могут открыть новые возможности для улавливания, связывания и манипулирования наночастицами, а также решить некоторые проблемы, связанные с обычными оптическими пинцетами.

В статье [24] исследуется взаимодействие между квантовыми геометрическими эффектами и поверхностными плазмонами через поверхностные плазмонные структуры на основе электронной гидродинамической теории. Сначала продемонстрировано, что квантовый нелинейный эффект Холла может быть резко усилен в очень широком диапазоне частот за счёт использования плазмонного резонанса и эффектов ближнего поля решётчатых затворов. В резонансных условиях усиление становится на несколько порядков больше, чем в случае без наноструктур, в то время как пики высокогармонических плазмонов широко расширяются и появляются в нерезонансных условиях, что приводит к удивительно широкому спектру. Кроме того, выяснена универсальная связь между фототоком, индуцированным диполем кривизны Берри, и оптическим поглощением, что важно для расчётного дизайна материалов длинноволновых фотодетекторов. Далее обсуждается новый механизм геометрического фототока, который возникает из-за аномальной силы, индуцированной колеблющимися магнитными полями, и описывается дипольным моментом орбитальных магнитных моментов блоховских электронов в импульсном пространстве. Теория имеет отношение к двумерным квантовым материалам, таким как слоистый WTe_2 и скрученный двухслойный графен, тем самым обеспечивая многообещающий путь к новому типу высокочувствительного широкополосного терагерцового фотодетектора.

Наноструктуры легированного графена являются многообещающей платформой для фотоники из-за их исключительно сильных и настраиваемых плазмонных резонансов. При размещении в конфигурации периодического массива плазмоны, поддерживаемые отдельными наноструктурами, взаимодействуют друг с другом и при соответствующих условиях могут вызывать коллективную моду, известную как решёточный резонанс. В статье [25] проводится всесторонний анализ отклика периодических массивов графеновых нанодисков и определяем условия, при которых система способна поддерживать решёточные резонансы. В статье [25] найдено, что соотношение между периодом решётки и длиной волны плазмона полностью определяет поведение системы. Как следствие, сильные резонансы решётки достигаются для нанодисков микронного размера в терагерцовом режиме. В статье [25] разрабатывается теоретическая модель, выходящая за рамки электростатического приближения, и используем её для получения закрытых аналитических выражений для силы, длины волны и ширины оптического резонанса массивов. Теоретическая основа, разработанная в работе [25], прокладывает путь к легкому дизайну и открытию новых свойств периодических массивов графеновых наноструктур, которые могут найти применение в фотонике и плазмонике.

Метаповерхности вместе с графеновой плазмоникой стали играть важную роль в контроле излучательной способности в теплотехнике как пассивно, за счёт изменения геометрических параметров и плотности упаковки метаповерхностей, так и активно, за счёт графенового вентилирования или легирования. В статье [26] демонстрируется плазмонная метаповерхность, состоящая из связанной системы из графена и нанопроволоки, использующую гибридные локализованные поверхностные плазмонные моды массива нанопроволок и графена. Массив нанопроволок делает гибридную моду поверхностного плазмона локализованной, обеспечивая возбуждение в свободном пространстве. Одно-

слоистый графен через вентиль между нижним зеркалом и верхним электродом может активно регулировать спектральную излучательную способность почти на 90%. Кроме того, поверхностные плазмонные моды графена устраняют строгую поляризационную зависимость излучения массива нанопроволок, что приводит к пятикратному увеличению коэффициента излучения p -поляризованного излучения, особенно при больших углах излучения.

В статье [27] показано, что резонансное плазмонное детектирование резко увеличивает чувствительность терагерцовых детекторов на основе графеновой p - i - n полевой транзисторной структуры.

В статье [28] сообщается об исследовании трёхслойного графена в инфракрасном диапазоне с порядком укладки АВА (Бернал) и АВС (ромбоэдрический) с использованием сканирующего ближнепольного оптического микроскопа рассеивающего типа. С сканирующим ближнепольным оптическим микроскопом рассеивающего типа, работающим в среднем инфракрасном диапазоне, отображаются в реальном пространстве поверхностные плазмонные поляритоны трёхслойного графена АВА и трёхслойного графена АВС, которые настраиваются с помощью электрического стробирования. Благодаря количественному моделированию данных плазмонной визуализации обнаружено, что длина волны плазмона трёхслойного графена АВА значительно больше, чем у трёхслойного графена АВС, что приводит к значительному несоответствию импеданса и, следовательно, к сильному отражению плазмона на боковом соединении АВА/АВС. Дальнейший анализ показывает, что разные плазмонные отклики двух типов трёхслойного графена напрямую связаны с их различными электронными структурами и свойствами носителя. В статье [28] рассматривается физика плазмонных откликов трёхслойного графена, зависящих от укладки, и проливает свет на будущие применения трёхслойного графена и переходов АВА/АВС в инфракрасной плазмонике и планарной нанооптике.

Оптические границы раздела сред с произвольной магнитной и электрической проводимостью поверхности могут позволить разрабатывать фотонные устройства с новыми функциями, но практических подходов на сегодняшний день не существует. Обычные границы раздела сред, такие как с графеном, интересны с оптической точки зрения из-за их настраиваемой электропроводности поверхности. Однако их магнитная поверхностная проводимость незначительна, поскольку магнитный отклик в природных материалах обычно слабый, начиная с терагерцовой частоты. Поиски искусственного магнитного отклика недавно привели к разработке магнитных метаповерхностей, которые, однако, могут обеспечить границу раздела сред только с ограниченным значением поверхностной магнитной проводимости. В статье [29] обнаружено, что вертикальные гетероструктуры на основе регулярных немагнитных метаповерхностей имеют прямое соответствие оптической границе раздела как с магнитной, так и с электрической поверхностной проводимостью, желаемые значения которых могут быть структурно спроектированы. Кроме того, идентифицированы несколько уникальных фотонных и плазмонных откликов на оптических интерфейсах с удельной магнитной проводимостью поверхности, включая нечувствительный к поляризации эффект Брюстера и чисто магнитные поверхностные волны.

Рамановское рассеяние, усиленное поверхностью, основано на способности поверхностной подложки усиливать сигналы комбинационного рассеяния для сенсорных и визуализирующих приложений. Наиболее широко используемые подложки комбинационного рассеяния света из золота и серебра с усиленной поверхностью в основном основаны на электромагнитном механизме с большими коэффициентами усиления, которые, однако, ограничены небольшими зазорами из-за туннелирования. Графен был исследован в качестве альтернативного субстрата для рамановского рассеяния с графе-

ном, основанного на химическом механизме. Однако пределы коэффициентов усиления химического механизма в подложках на основе графена до конца не изучены, особенно в зависимости от расстояния между наконечником и образцом. В статье [30] выполнено усиленное наконечником комбинационное рассеяние углеродных нанотрубок на гибридных подложках из золота и оксида графена для разных расстояний между наконечником и образцом. В статье [30] приводятся доказательства квантовой плазмоники с оксидом графена в качестве туннельного перехода в полости Au-оксид графена-Au с размером зазора 2 нм. В статье [30] демонстрируется усиление сигнала комбинационного рассеяния на четыре порядка сверх предела туннелирования электромагнитного механизма путем переключения в режим химического механизма для резонансного возбуждения оксида графена на малом расстоянии зонд-образец. Индуцированное наконечником рамановское рассеяние, усиленное оксидом графена, может быть использовано для улучшения наноизображения и биосенсоров на новых гибридных подложках оксид графена/Au.

В статье [31] аналитически получено явное условие для высококонтрастной плазмонной модуляции и переключаемой маршрутизации в связанных графеновых волноводах, состоящих из двух связанных стробируемых графеновых листов, расположенных между гиротропной средой. Аналитическое условие интуитивно предсказывает, что, манипулируя химическим потенциалом графена и вращением промежуточной среды, можем сочетать надежность плазмонной маршрутизации с отклонением параметров конструкции и материала из-за несовершенного изготовления и суровых условий окружающей среды с чрезвычайно высокой контрастностью. Кроме того, он предсказывает широкополосную перестраиваемость высококонтрастной плазмонной маршрутизации. Интуитивное аналитическое условие показывает, что высокая контрастность достижима при резонансном вращении за счёт магнитного резонанса невзаимной направленной связи. Магнитный резонанс невзаимности разрушает существующее в настоящее время предубеждение, что более сильное магнитное поле индуцирует более сильную магнитно-индуцированную невзаимность. Численное моделирование демонстрирует надежность магнитного резонанса невзаимности и его настраиваемость в спектральном диапазоне, охватывающем одну октаву. На практике химическим потенциалом и вращением можно управлять, контролируя напряжение на затворе графена и внешнее магнитное поле соответственно. Выводы, полученные в статье [31], обеспечат надёжный и широкополосный настраиваемый инструмент для высококонтрастного плазмонного модулятора и переключаемого маршрутизатора, а также для исследования сверхбыстрой динамики намагниченности.

В статье [32] используется полностью оптический метод накачки-зонда для разработки механизма измерения массы в молекулярно-плазмонной системе при комнатной температуре. Система состоит из дважды зажатой графеновой наноленты, параметрически взаимодействующей с двумя типами изотропных и анизотропных сферических плазмонных полостей в присутствии сильного поля накачки и слабого зондирующего импульса. На основе схемы селективного квантования и аналогии с канонической моделью резонаторной оптомеханики формулируем гамильтониан системы через электромагнитный тензор Грина. Таким образом, получен явный вид зависящей от размера оптомеханической функции связи и скорости плазмонного затухания, которые включают модальные, геометрические и материальные особенности плазмонной структуры. Технические особенности материала плазмонной наноструктуры показывают, что интенсивность спектра пропускания зондирующего поля для радиально анизотропной сферической нанорезонатора значительно увеличивается по сравнению с нанорезонаторной сферой из серебра из-за уменьшения объёма моды.

Плазмонная связь является одним из наиболее важных эффектов в компактных

плазмонных системах и интенсивно изучается. Напротив, магнитоплазменная связь редко упоминается даже в графеновых наноструктурах, поддерживающих сильный магнитооптический эффект. В статье [33] теоретически исследуется магнитоплазмонную связь в димерах графеновых нанодисков в присутствии либо параллельных (случай I), либо антипараллельных (случай II) магнитных полей. В статье [33] обнаружено, что гибридные моды всегда появляются для двух состояний с одинаковой хиральностью, тогда как их возбуждения зависят от падающей поляризации. Более того, в случае I две антисимметричные моды темные, а в случае II все четыре моды светлые. Для лучшего понимания представлена расширенная модель связанных диполей, в которой фундаментальные магнитоплазмоны с круговой поляризацией разлагаются на два линейных и ортогональных диполя с разностью фаз $\pi/2$, а затем связь описывается двумя линейными диполями вдоль два ортогональных направления отдельно. Параметры магнитооптического эффекта и силы связи независимы и могут быть легко извлечены из их отдельных моделей. Собственные значения и волновые функции, полученные из модели, могут хорошо описывать резонансную частоту и силу возбуждения каждой гибридной моды. Наконец, мы обсудим магнитоплазмонную связь в соприкасающихся графеновых нанодисках, где плазмон с переносом заряда невосприимчив к магнитооптическому эффекту, а в случае II состояние кругового резонанса будет заменено линейным с падающим электрическим полем вдоль направления касания. В статье [33] предлагается, что общая основа для исследования связи мод двух круговых состояний и прокладывает путь к магнитооптическим и плазмонным приложениям.

Новые экспериментальные данные о значении показателя преломления графена были получены в работе [34].

Графен и материалы на основе графена открывают широкие перспективы для многочисленных фотонных и плазмонных приложений [35–41]. Волноводы на основе графена поддерживают локализованные электромагнитные волны поверхностного плазмон-поляритона, как ТЕ-поляризованные, так и ТМ-поляризованные электромагнитные волны [42–50]. Их тесное удержание и большая длина распространения позволяют наблюдать сильные взаимодействия света с веществом в структурах на основе графена [51]. Оптические свойства графена можно контролировать с помощью ряда внешних параметров, таких как электростатическое смещение, магнитное поле или химическое легирование.

Проведённый анализ научной литературы показал актуальность исследования наноконструктивных структур графеновой плазмоники.

Результаты разработки структуры и элементов курса

Приведём описание результатов разработки модульной структуры и избранных элементов дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена» в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета. Опишем результаты разработки информационной системы, предназначенной для поддержки преподавания учебной дисциплины «Наноплазмоника графена», в процессе практико-ориентированной подготовки педагога в магистратуре педагогического университета в условиях смешанного обучения.

Входная страница дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета, изображена на рис. 1. На входной странице дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена» содержатся сведения о названии дистанционного курса, преподавателях курса, вводном описании курса.

На рис. 2 изображена страница, содержащая первую часть модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управ-

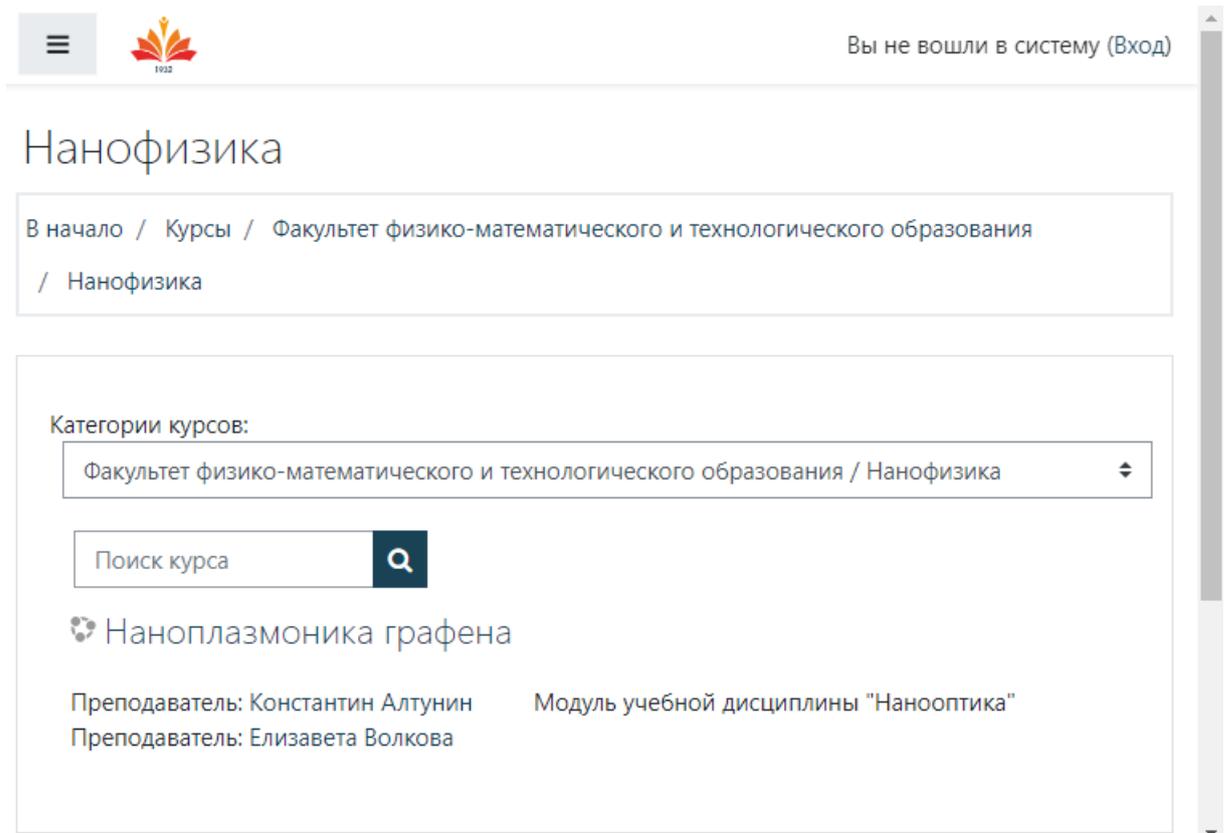


Рис. 1. Входная страница дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

ления обучением MOODLE на образовательном портале университета. Первой темой в первой части модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена» является тема по классической оптике графена. Второй темой в первой части модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена» является тема по нелинейной оптике графена. Третьей темой в первой части модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена» является тема по квантовой оптике графена.

На рис. 3 изображена страница, содержащая вторую часть модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

Четвёртой темой во второй части модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена» является тема по наноплазмонным излучателям на основе графена. Пятой темой во второй части модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена» является тема по плазмонным наноантеннам на основе графена и графана. Шестой темой во второй части модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена» является тема по плазмонным наноантеннам на основе борофена и борофана.

На рис. 4 изображена страница, содержащая элементы первой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

На рис. 5 изображена страница, содержащая элементы второй темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

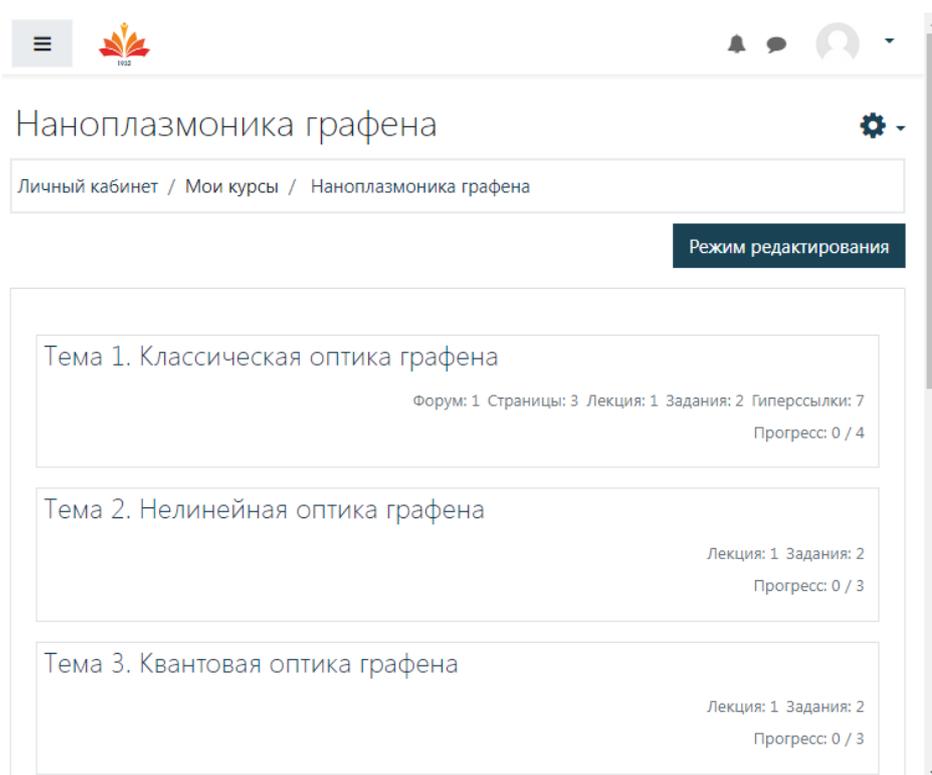


Рис. 2. Страница, содержащая первую часть модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

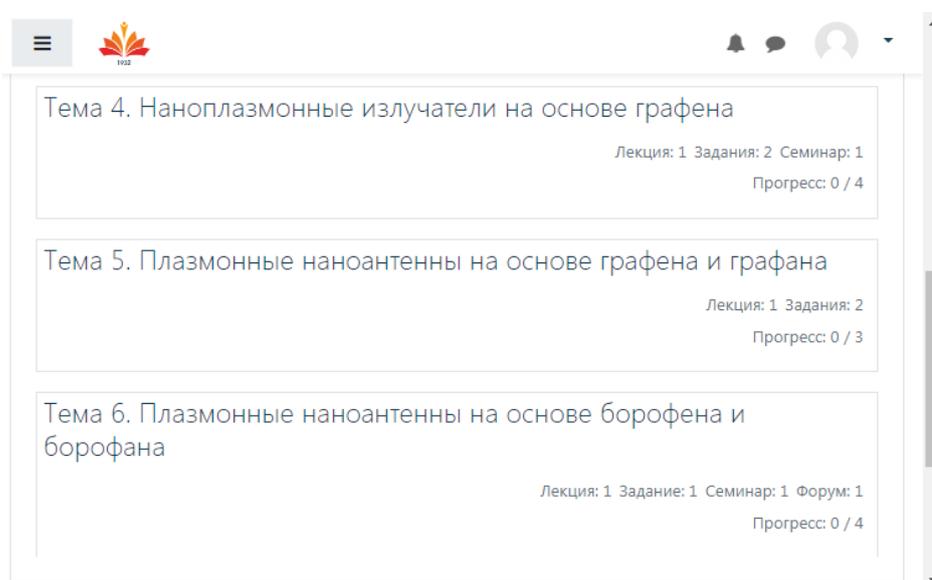


Рис. 3. Страница, содержащая вторую часть модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

На рис. 6 изображена страница, содержащая элементы третьей темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

На рис. 7 изображена страница, содержащая элементы четвертой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе

Наноплазмоника графена

Личный кабинет / Мои курсы / Наноплазмоника графена / Тема 1. Классическая оптика графена

Режим редактирования

Тема 2. Нелинейная оптика графена ▶

Тема 1. Классическая оптика графена

- Объявления
- Содержание компетенции
- Индикаторы достижения компетенций
- Лекция 1. Классическая оптика графена
- Структура графена
- Практическое занятие 1. Классическая оптика графена
- Практическое занятие 2. Классическая оптика графена
- Ашкрофт, Н. Физика твердого тела / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – Москва : Мир, 1978. – Том 1. – 391 с.
- Ашкрофт, Н. Физика твердого тела / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – Москва : Мир, 1979. – Том 2. – 419 с.
- Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель ; пер. с англ. А. Гусева. – Москва : Наука, 1978. – 788 с.
- Жданов, Г. С. Физика твердого тела / Г. С. Жданов. – Москва : Издательство МГУ, 1962. – 505 с.

Рис. 4. Страница, содержащая элементы первой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

На рис. 8 изображена страница, содержащая элементы пятой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

На рис. 9 изображена страница, содержащая элементы шестой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управления обучением MOODLE.

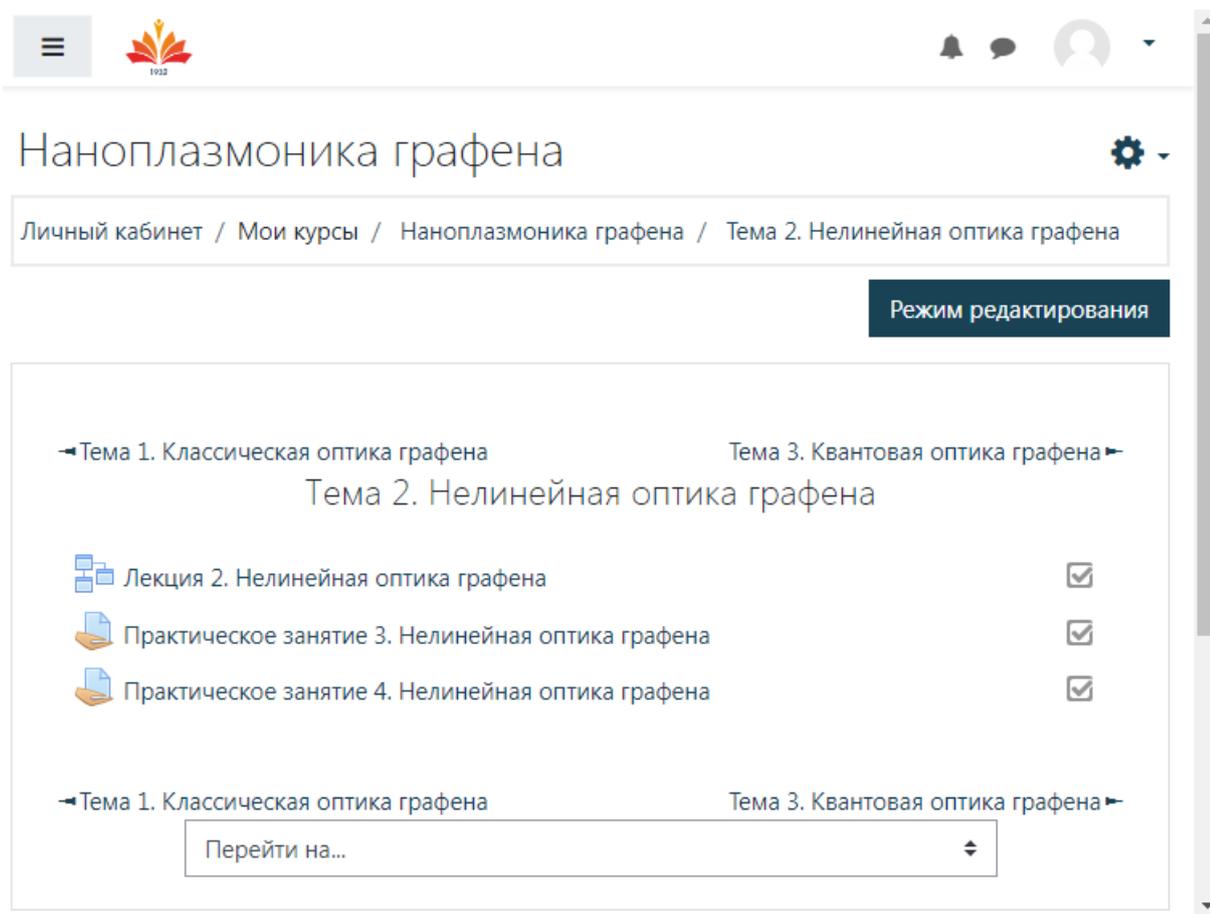


Рис. 5. Страница, содержащая элементы второй темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

Результаты экспертной оценки дистанционного курса по наноплазмонике графена

Экспертная оценка разработанного дистанционного курса по наноплазмонике графена проводилась десятью экспертами по восьми критериям: структура, интерактивность, навигация, дизайн, интерфейс, диагностика, организация самостоятельной работы, соблюдение авторских прав. По каждому из восьми критериев выставлялась отметка по десятибалльной шкале.

Эксперт 1 за структуру курса выставил 7 баллов, за интерактивность курса выставил 8 баллов, за навигацию курса выставил 7 баллов, за дизайн курса выставил 7 баллов, за интерфейс курса выставил 7 баллов, за диагностику курса выставил 6 баллов, за организацию самостоятельной работы курса выставил 7 баллов, за соблюдение авторских прав в курсе выставил 9 баллов.

Эксперт 2 за структуру курса выставил 10 баллов, за интерактивность курса выставил 7 баллов, за навигацию курса выставил 8 баллов, за дизайн курса выставил 6 баллов, за интерфейс курса выставил 8 баллов, за диагностику курса выставил 6 баллов, за организацию самостоятельной работы курса выставил 6 баллов, за соблюдение авторских прав в курсе выставил 10 баллов.

Эксперт 3 за структуру курса выставил 10 баллов, за интерактивность курса выставил 6 баллов, за навигацию курса выставил 7 баллов, за дизайн курса выставил 7 баллов, за интерфейс курса выставил 9 баллов, за диагностику курса выставил 7 баллов, за организацию самостоятельной работы курса выставил 9 баллов, за соблюдение

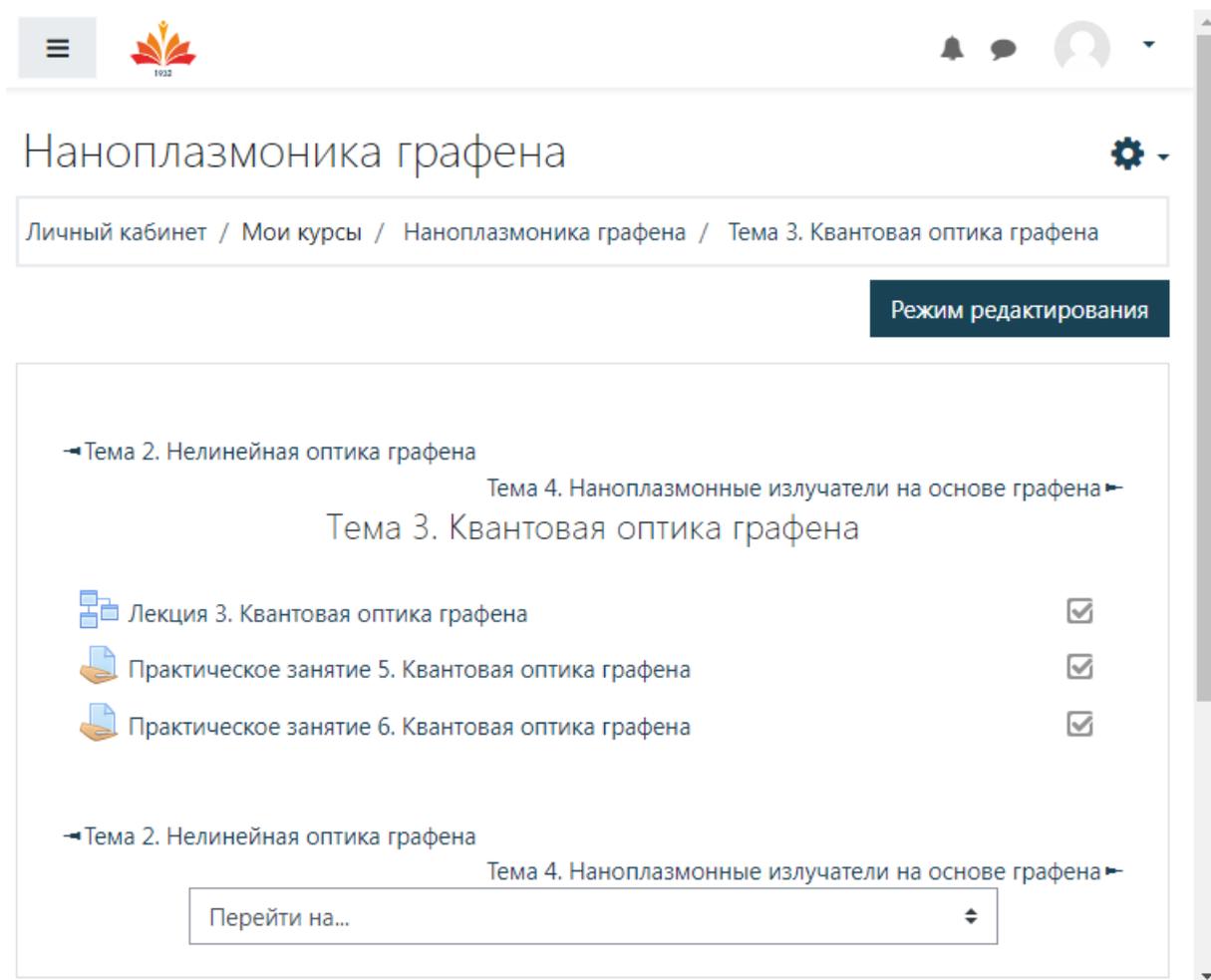


Рис. 6. Страница, содержащая элементы третьей темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

авторских прав в курсе выставил 10 баллов.

Эксперт 4 за структуру курса выставил 10 баллов, за интерактивность курса выставил 10 баллов, за навигацию курса выставил 10 баллов, за дизайн курса выставил 8 баллов, за интерфейс курса выставил 9 баллов, за диагностику курса выставил 6 баллов, за организацию самостоятельной работы курса выставил 7 баллов, за соблюдение авторских прав в курсе выставил 10 баллов.

Эксперт 5 за структуру курса выставил 9 баллов, за интерактивность курса выставил 8 баллов, за навигацию курса выставил 9 баллов, за дизайн курса выставил 6 баллов, за интерфейс курса выставил 9 баллов, за диагностику курса выставил 8 баллов, за организацию самостоятельной работы курса выставил 6 баллов, за соблюдение авторских прав в курсе выставил 9 баллов.

Эксперт 6 за структуру курса выставил 8 баллов, за интерактивность курса выставил 7 баллов, за навигацию курса выставил 7 баллов, за дизайн курса выставил 7 баллов, за интерфейс курса выставил 9 баллов, за диагностику курса выставил 7 баллов, за организацию самостоятельной работы курса выставил 7 баллов, за соблюдение авторских прав в курсе выставил 8 баллов.

Эксперт 7 за структуру курса выставил 9 баллов, за интерактивность курса выставил 8 баллов, за навигацию курса выставил 8 баллов, за дизайн курса выставил 6 баллов, за интерфейс курса выставил 7 баллов, за диагностику курса выставил 6 бал-

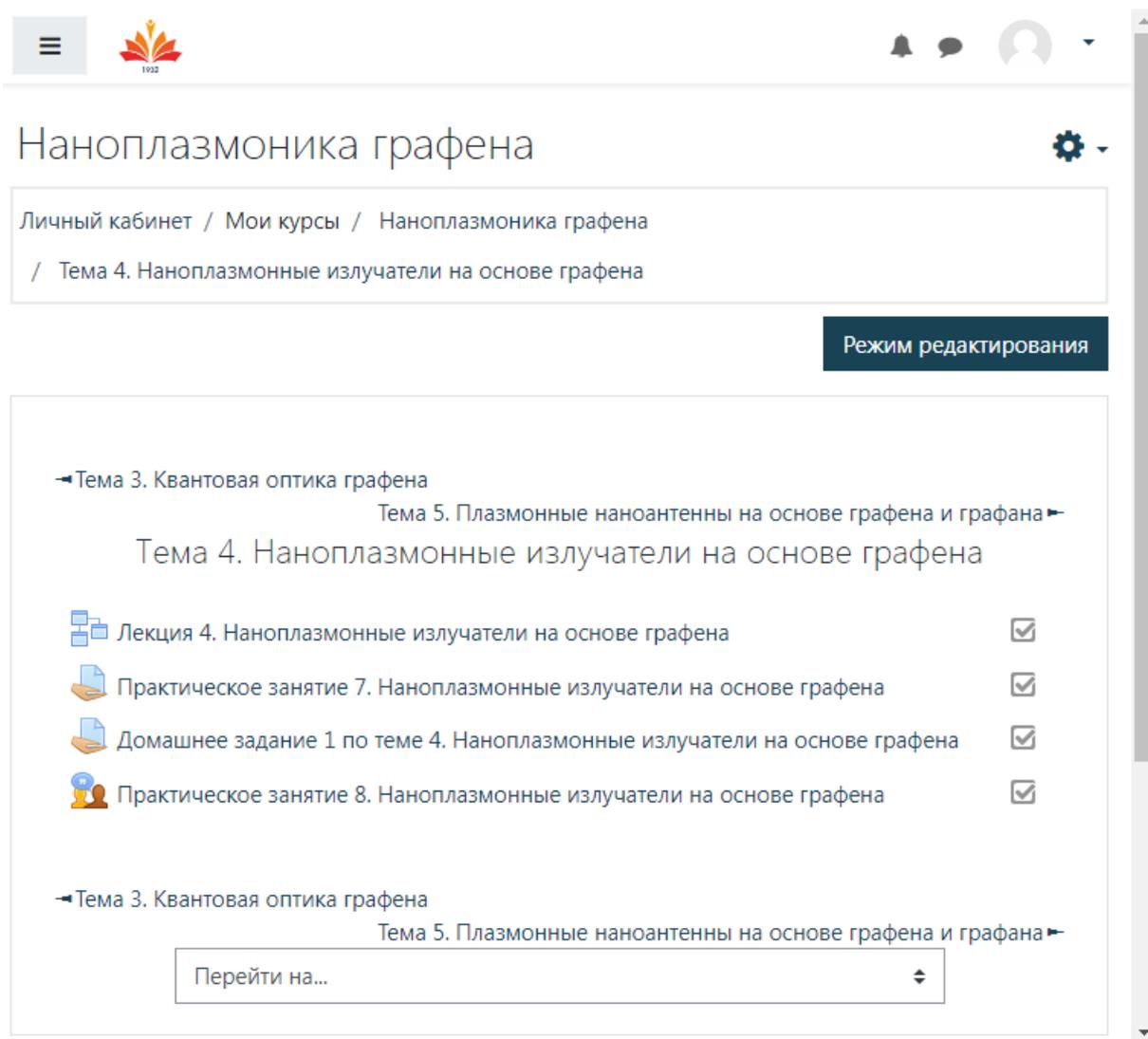


Рис. 7. Страница, содержащая элементы четвёртой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

лов, за организацию самостоятельной работы курса выставил 6 баллов, за соблюдение авторских прав в курсе выставил 10 баллов.

Эксперт 8 за структуру курса выставил 8 баллов, за интерактивность курса выставил 6 баллов, за навигацию курса выставил 9 баллов, за дизайн курса выставил 7 баллов, за интерфейс курса выставил 8 баллов, за диагностику курса выставил 7 баллов, за организацию самостоятельной работы курса выставил 6 баллов, за соблюдение авторских прав в курсе выставил 10 баллов.

Эксперт 9 за структуру курса выставил 10 баллов, за интерактивность курса выставил 8 баллов, за навигацию курса выставил 9 баллов, за дизайн курса выставил 7 баллов, за интерфейс курса выставил 8 баллов, за диагностику курса выставил 6 баллов, за организацию самостоятельной работы курса выставил 6 баллов, за соблюдение авторских прав в курсе выставил 10 баллов.

Эксперт 10 за структуру курса выставил 9 баллов, за интерактивность курса выставил 9 баллов, за навигацию курса выставил 7 баллов, за дизайн курса выставил 8 баллов, за интерфейс курса выставил 9 баллов, за диагностику курса выставил 8 баллов, за организацию самостоятельной работы курса выставил 7 баллов, за соблюдение авторских прав в курсе выставил 9 баллов.

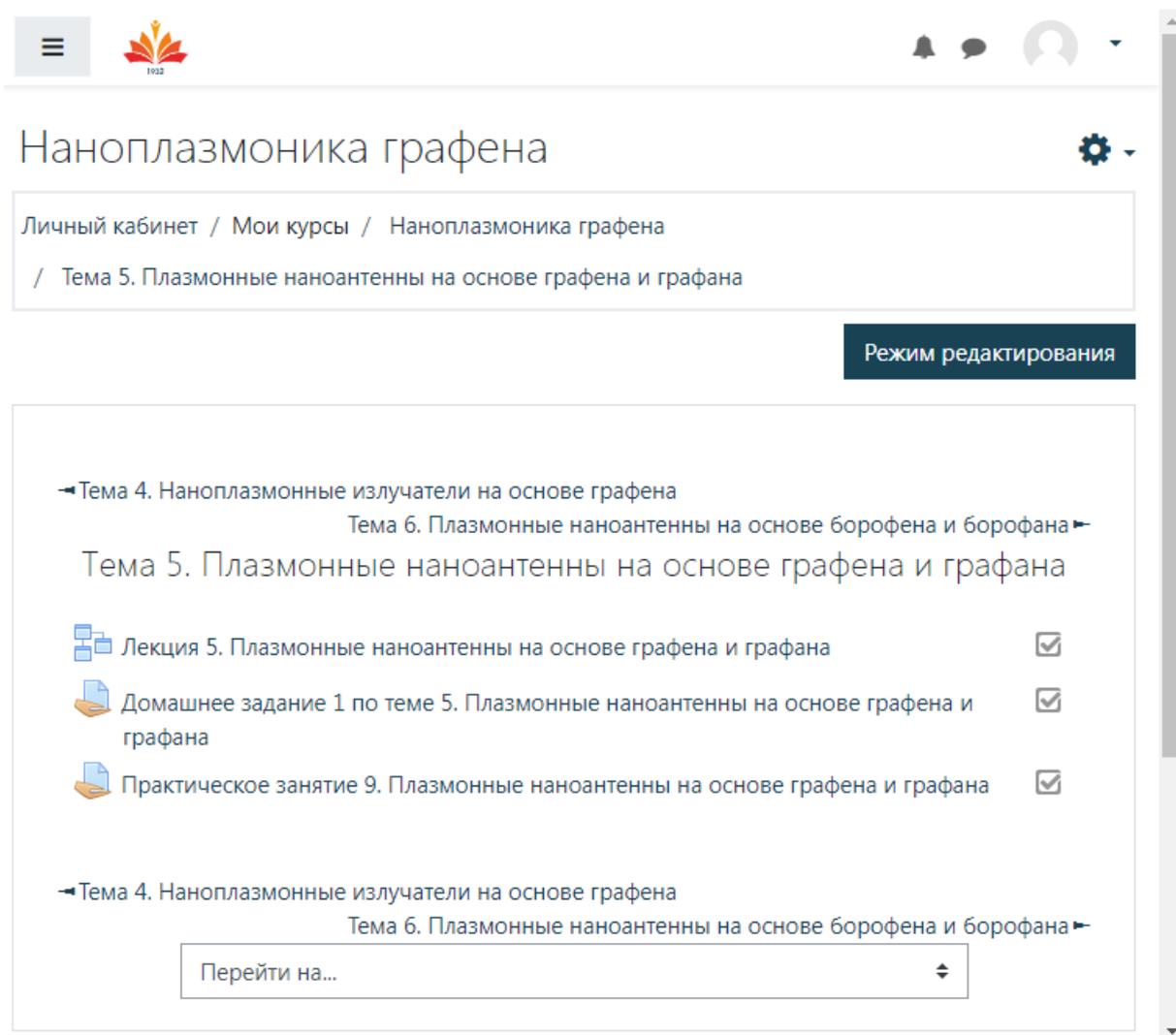


Рис. 8. Страница, содержащая элементы пятой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Наноплазмоника графена», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

Используя экспертные отметки по каждому критерию оценивания дистанционного курса по наноплазмонике графена вычислим средние значения по каждому критерию оценивания. Среднее значение отметок экспертов за структуру дистанционного курса по наноплазмонике графена составило 9.0. Среднее значение отметок экспертов за интерактивность дистанционного курса по наноплазмонике графена составило 7.7. Среднее значение отметок экспертов за навигацию дистанционного курса по наноплазмонике графена составило 8.1. Среднее значение отметок экспертов за дизайн дистанционного курса по наноплазмонике графена составило 6.9. Среднее значение отметок экспертов за интерфейс дистанционного курса по наноплазмонике графена составило 8.3. Среднее значение отметок экспертов за диагностику дистанционного курса по наноплазмонике графена составило 6.7. Среднее значение отметок экспертов за организацию самостоятельной работы дистанционного курса по наноплазмонике графена составило 6.7. Среднее значение отметок экспертов за соблюдение авторских прав в дистанционном курсе по оптике нанопокрываний составило 9.5. Сумма средних значений по восьми критериям составила 62.9. Если перевести рейтинговую отметку по курсу в проценты, то получим значение, равное 78.63 %, что соответствует оптимальному уровню дистанционного курса по наноплазмонике графена.

2. Cyclotron and magnetoplasmon resonances in bilayer graphene ratchets / E. Mönch [et al.] // *Physical Review B*. — 2023. — mar. — Vol. 107, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.115408>.
3. Krasavin A. V., Zheludev N. I. Active plasmonics: Controlling signals in Au/Ga waveguide using nanoscale structural transformations // *Applied Physics Letters*. — 2004. — feb. — Vol. 84, no. 8. — P. 1416–1418. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.1650904>.
4. Exciton-Plasmon-Photon Conversion in Plasmonic Nanostructures / Y. Fedutik [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2007. — sep. — Vol. 99, no. 13. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.99.136802>.
5. Active magneto-plasmonics in hybrid metal–ferromagnet structures / Vasily V. Temnov [et al.] // *Nature Photonics*. — 2010. — jan. — Vol. 4, no. 2. — P. 107–111. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2009.265>.
6. Enhancement of Multiphoton Emission from Single CdSe Quantum Dots Coupled to Gold Films / Sharonda J. LeBlanc [et al.] // *Nano Letters*. — 2013. — mar. — Vol. 13, no. 4. — P. 1662–1669. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl400117h>.
7. Abbasi Fereshteh, Davoyan Arthur R, Engheta Nader. One-way surface states due to nonreciprocal light-line crossing // *New Journal of Physics*. — 2015. — jun. — Vol. 17, no. 6. — P. 063014. — URL: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/17/6/063014>.
8. Kurkin M. I., Bakulina N. B., Pisarev R. V. Transient inverse Faraday effect and ultrafast optical switching of magnetization // *Physical Review B*. — 2008. — oct. — Vol. 78, no. 13. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.78.134430>.
9. Ultrafast Spin Dynamics in Multisublattice Magnets / J. H. Mentink [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2012. — jan. — Vol. 108, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.108.057202>.
10. Kirilyuk Andrei, Kimel Alexey V, Rasing Theo. Laser-induced magnetization dynamics and reversal in ferrimagnetic alloys // *Reports on Progress in Physics*. — 2013. — feb. — Vol. 76, no. 2. — P. 026501. — URL: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/76/2/026501>.
11. Kurkin M.I., Orlova N.B. Femtosecond magneto-optics and ultrafast magnetization reversal of ferromagnetic // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. — 2014. — jun. — Vol. 361. — P. 224–231. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.02.079>.
12. Belotelov V. I., Doskolovich L. L., Zvezdin A. K. Extraordinary Magneto-Optical Effects and Transmission through Metal-Dielectric Plasmonic Systems // *Physical Review Letters*. — 2007. — feb. — Vol. 98, no. 7. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.98.077401>.
13. Surface Plasmon Resonance Enhanced Magneto-Optics (SuPREMO): Faraday Rotation Enhancement in Gold-Coated Iron Oxide Nanocrystals / Prashant K. Jain [et al.] // *Nano Letters*. — 2009. — mar. — Vol. 9, no. 4. — P. 1644–1650. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl900007k>.
14. Localized surface plasmon resonance enhanced magneto-optical activity in core-shell Fe–Ag nanoparticles / L. Wang [et al.] // *Journal of Applied Physics*. — 2010. — may. — Vol. 107, no. 9. — P. 09B303. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.3355905>.

15. Enhanced magneto-optical effects in magnetoplasmonic crystals / V. I. Belotelov [et al.] // *Nature Nanotechnology*. — 2011. — apr. — Vol. 6, no. 6. — P. 370–376. — URL: <https://doi.org/10.1038/nano.2011.54>.
16. Waveguide-Plasmon Polaritons Enhance Transverse Magneto-Optical Kerr Effect / Lars E. Kreilkamp [et al.] // *Physical Review X*. — 2013. — nov. — Vol. 3, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevx.3.041019>.
17. Photonic crystals with plasmonic patterns: novel type of the heterostructures for enhanced magneto-optical activity / N. E. Khokhlov [et al.] // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2015. — feb. — Vol. 48, no. 9. — P. 095001. — URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/9/095001>.
18. Nonlinear surface magnetoplasmonics in Kretschmann multilayers / Ilya Razdolski [et al.] // *ACS Photonics*. — 2016. — jan. — Vol. 3, no. 2. — P. 179–183. — URL: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.5b00504>.
19. Temnov Vasily V. Ultrafast acousto-magneto-plasmonics // *Nature Photonics*. — 2012. — nov. — Vol. 6, no. 11. — P. 728–736. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.220>.
20. Safarzadeh Fatemeh, Farzad Mahmood Hosseini. Nanoplasmonic hybrid hotspot in graphene transistor // *Physical Review B*. — 2023. — feb. — Vol. 107, no. 7. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.075439>.
21. Jeyar Youssef, Antezza Mauro, Guizal Brahim. Electromagnetic scattering by a partially graphene-coated dielectric cylinder: Efficient computation and multiple plasmonic resonances // *Physical Review E*. — 2023. — feb. — Vol. 107, no. 2. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.107.025306>.
22. Nanoscale infrared imaging and spectroscopy of hot-electron plasmons in graphene / Yilong Luan [et al.] // *Physical Review B*. — 2023. — feb. — Vol. 107, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.085414>.
23. Paul Nayan K., Gomez-Diaz J. Sebastian. Lateral recoil optical forces on nanoparticles near nonreciprocal surfaces // *Physical Review B*. — 2023. — jan. — Vol. 107, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.035417>.
24. Toshio Riki, Kawakami Norio. Plasmonic quantum nonlinear Hall effect in noncentrosymmetric two-dimensional materials // *Physical Review B*. — 2022. — nov. — Vol. 106, no. 20. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.1201301>.
25. Optical Response of Periodic Arrays of Graphene Nanodisks / Juan R. Deop-Ruano [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2022. — oct. — Vol. 18, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.18.044071>.
26. Active control of thermal emission by graphene-nanowire coupled plasmonic metasurfaces / Jiayu Li [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — sep. — Vol. 106, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.115416>.
27. Resonant Plasmonic Terahertz Detection in Gated Graphene p-i-n Field-Effect Structures Enabled by Nonlinearity from Zener-Klein Tunneling / V. Ryzhii [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2022. — sep. — Vol. 18, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.18.034022>.

28. Imaging Stacking-Dependent Surface Plasmon Polaritons in Trilayer Graphene / Yilong Luan [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2022. — aug. — Vol. 18, no. 2. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.18.024052>.
29. Optical interface engineering with on-demand magnetic surface conductivities / Yuhan Zhong [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — jul. — Vol. 106, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.035304>.
30. Switching from electromagnetic to chemical mechanism in quantum plasmonic tip-induced graphene oxide enhanced Raman scattering / Hana N. Hrim [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — jul. — Vol. 106, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.035410>.
31. Magnetic resonance of plasmonic modulation and switchable routing in gated graphene waveguides and their robustness and broadband tunability / Kum-Dong Kim [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — jul. — Vol. 106, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.1041401>.
32. Alebrahim Elnaz, Harouni Malek Bagheri, Amooghorban Ehsan. Influence of spherical anisotropy on optical mass sensing in plasmonic-molecular optomechanics // *Physical Review A*. — 2022. — jun. — Vol. 105, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.105.062609>.
33. Wang Ningning, Ding Linhui, Wang Weihua. Magnetoplasmonic coupling in graphene nanodisk dimers: An extended coupled-dipole model for circularly polarized states // *Physical Review B*. — 2022. — jun. — Vol. 105, no. 23. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.105.235435>.
34. Dielectric function of epitaxial quasi-freestanding monolayer graphene on Si-face 6H-SiC in a broad spectral range / Kristupas Kazimieras Tikuišis [et al.] // *Physical Review Materials*. — 2023. — apr. — Vol. 7, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevmaterials.7.044201>.
35. Bao Qiaoliang, Loh Kian Ping. Graphene photonics, plasmonics, and broadband optoelectronic devices // *ACS Nano*. — 2012. — may. — Vol. 6, no. 5. — P. 3677–3694. — URL: <https://doi.org/10.1021/nn300989g>.
36. Grigorenko A. N., Polini M., Novoselov K. S. Graphene plasmonics // *Nature Photonics*. — 2012. — nov. — Vol. 6, no. 11. — P. 749–758. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.262>.
37. de Abajo F. Javier García. Graphene plasmonics: challenges and opportunities // *ACS Photonics*. — 2014. — feb. — Vol. 1, no. 3. — P. 135–152. — URL: <https://doi.org/10.1021/ph400147y>.
38. Graphene plasmonics: physics and potential applications / Shenyang Huang [et al.] // *Nanophotonics*. — 2016. — oct. — Vol. 6, no. 6. — P. 1191–1204. — URL: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2016-0126>.
39. Flatland plasmonics and nanophotonics based on graphene and beyond / Pai-Yen Chen [et al.] // *Nanophotonics*. — 2017. — apr. — Vol. 6, no. 6. — P. 1239–1262. — URL: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2016-0137>.

40. Low Tony, Avouris Phaedon. Graphene plasmonics for terahertz to mid-infrared applications // ACS Nano. — 2014. — jan. — Vol. 8, no. 2. — P. 1086–1101. — URL: <https://doi.org/10.1021/nn406627u>.
41. Polaritons in layered two-dimensional materials / Tony Low [et al.] // Nature Materials. — 2016. — nov. — Vol. 16, no. 2. — P. 182–194. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat4792>.
42. Mikhailov S. A., Ziegler K. New electromagnetic mode in graphene // Physical Review Letters. — 2007. — jul. — Vol. 99, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.99.016803>.
43. Hanson George W. Quasi-transverse electromagnetic modes supported by a graphene parallel-plate waveguide // Journal of Applied Physics. — 2008. — oct. — Vol. 104, no. 8. — P. 084314. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.3005881>.
44. A primer on surface plasmon-polaritons in graphene / Yu. V. Bludov [et al.] // International Journal of Modern Physics B. — 2013. — apr. — Vol. 27, no. 10. — P. 1341001. — URL: <https://doi.org/10.1142/s0217979213410014>.
45. Kotov O. V., Kol'chenko M. A., Lozovik Yu. E. Ultrahigh refractive index sensitivity of TE-polarized electromagnetic waves in graphene at the interface between two dielectric media // Optics Express. — 2013. — may. — Vol. 21, no. 11. — P. 13533. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.21.013533>.
46. Plasmons in waveguide structures formed by two graphene layers / P. I. Buslaev [et al.] // JETP Letters. — 2013. — jul. — Vol. 97, no. 9. — P. 535–539. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364013090063>.
47. Multilayer graphene waveguides / D. A. Smirnova [et al.] // JETP Letters. — 2014. — jun. — Vol. 99, no. 8. — P. 456–460. — URL: <https://doi.org/10.1134/s002136401408013x>.
48. Plasmons in Cylindrical 2D Materials as a Platform for Nanophotonic Circuits / Irati Soto Lamata [et al.] // ACS Photonics. — 2015. — jan. — Vol. 2, no. 2. — P. 280–286. — URL: <https://doi.org/10.1021/ph500377u>.
49. Transverse-electric plasmonic modes of cylindrical graphene-based waveguide at near-infrared and visible frequencies / Dmitry A. Kuzmin [et al.] // Scientific Reports. — 2016. — may. — Vol. 6, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/srep26915>.
50. Analytical model for plasmon modes in graphene-coated nanowire / Yixiao Gao [et al.] // Optics Express. — 2014. — sep. — Vol. 22, no. 20. — P. 24322. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.22.024322>.
51. Koppens Frank H. L., Chang Darrick E., de Abajo F. Javier García. Graphene Plasmonics: A Platform for Strong Light–Matter Interactions // Nano Letters. — 2011. — jul. — Vol. 11, no. 8. — P. 3370–3377. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl201771h>.

Сведения об авторах:

Константин Константинович Алтунин — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: kostya_altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

Елизавета Евгеньевна Волкова — студент магистратуры факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: liza_volkova1999@mail.ru

ORCID iD  0000-0003-2849-7090

Web of Science ResearcherID  AAZ-9027-2020

Original article
PACS 01.40.Di
OCIS 240.5420
MSC 00A79

Development of a distance course on graphene nanoplasmonics

K. K. Altunin , E. E. Volkova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted May 16, 2023

Resubmitted May 17, 2023

Published June 5, 2023

Abstract. The results of the development of a distance course on graphene nanoplasmonics in the MOODLE learning management system are described. The results of the development of a modular structure for a distance course on graphene nanoplasmonics in the learning management system MOODLE are discussed. The results of the development of the main elements of the distance course on graphene nanoplasmonics in the learning management system MOODLE are discussed. The results of the development of knowledge control elements for the course of graphene nanoplasmonics in the learning management system MOODLE are discussed. The results of an expert evaluation of a distance course on graphene nanoplasmonics in the learning management system MOODLE are presented.

Keywords: nanoplasmonics, graphene, plasmon, nanocomposite, distance course, learning management system, course element

References

1. Dutta Debasis, Chakraborty Atasi, Agarwal Amit. Intrinsic nonreciprocal bulk plasmons in noncentrosymmetric magnetic systems // *Physical Review B*. — 2023. — apr. — Vol. 107, no. 16. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.165404>.
2. Cyclotron and magnetoplasmon resonances in bilayer graphene ratchets / E. Mönch [et al.] // *Physical Review B*. — 2023. — mar. — Vol. 107, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.115408>.
3. Safarzadeh Fatemeh, Farzad Mahmood Hosseini. Nanoplasmonic hybrid hotspot in graphene transistor // *Physical Review B*. — 2023. — feb. — Vol. 107, no. 7. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.075439>.
4. Jeyar Youssef, Antezza Mauro, Guizal Brahim. Electromagnetic scattering by a partially graphene-coated dielectric cylinder: Efficient computation and multiple plasmonic resonances // *Physical Review E*. — 2023. — feb. — Vol. 107, no. 2. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.107.025306>.
5. Nanoscale infrared imaging and spectroscopy of hot-electron plasmons in graphene / Yilong Luan [et al.] // *Physical Review B*. — 2023. — feb. — Vol. 107, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.085414>.

6. Paul Nayan K., Gomez-Diaz J. Sebastian. Lateral recoil optical forces on nanoparticles near nonreciprocal surfaces // *Physical Review B*. — 2023. — jan. — Vol. 107, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.035417>.
7. Toshio Riki, Kawakami Norio. Plasmonic quantum nonlinear Hall effect in noncentrosymmetric two-dimensional materials // *Physical Review B*. — 2022. — nov. — Vol. 106, no. 20. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.1201301>.
8. Optical Response of Periodic Arrays of Graphene Nanodisks / Juan R. Deop-Ruano [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2022. — oct. — Vol. 18, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.18.044071>.
9. Active control of thermal emission by graphene-nanowire coupled plasmonic metasurfaces / Jiayu Li [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — sep. — Vol. 106, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.115416>.
10. Resonant Plasmonic Terahertz Detection in Gated Graphene p-i-n Field-Effect Structures Enabled by Nonlinearity from Zener-Klein Tunneling / V. Ryzhii [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2022. — sep. — Vol. 18, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.18.034022>.
11. Imaging Stacking-Dependent Surface Plasmon Polaritons in Trilayer Graphene / Yilong Luan [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2022. — aug. — Vol. 18, no. 2. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.18.024052>.
12. Optical interface engineering with on-demand magnetic surface conductivities / Yuhan Zhong [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — jul. — Vol. 106, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.035304>.
13. Switching from electromagnetic to chemical mechanism in quantum plasmonic tip-induced graphene oxide enhanced Raman scattering / Hana N. Hrim [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — jul. — Vol. 106, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.035410>.
14. Magnetic resonance of plasmonic modulation and switchable routing in gated graphene waveguides and their robustness and broadband tunability / Kum-Dong Kim [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — jul. — Vol. 106, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.1041401>.
15. Alebrahim Elnaz, Harouni Malek Bagheri, Amooghorban Ehsan. Influence of spherical anisotropy on optical mass sensing in plasmonic-molecular optomechanics // *Physical Review A*. — 2022. — jun. — Vol. 105, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.105.062609>.
16. Wang Ningning, Ding Linhui, Wang Weihua. Magnetoplasmonic coupling in graphene nanodisk dimers: An extended coupled-dipole model for circularly polarized states // *Physical Review B*. — 2022. — jun. — Vol. 105, no. 23. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.105.235435>.
17. Dielectric function of epitaxial quasi-freestanding monolayer graphene on Si-face 6H-SiC in a broad spectral range / Kristupas Kazimieras Tikuišis [et al.] // *Physical Review Materials*. — 2023. — apr. — Vol. 7, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevmaterials.7.044201>.

18. Bao Qiaoliang, Loh Kian Ping. Graphene photonics, plasmonics, and broadband optoelectronic devices // *ACS Nano*. — 2012. — may. — Vol. 6, no. 5. — P. 3677–3694. — URL: <https://doi.org/10.1021/nm300989g>.
19. Grigorenko A. N., Polini M., Novoselov K. S. Graphene plasmonics // *Nature Photonics*. — 2012. — nov. — Vol. 6, no. 11. — P. 749–758. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.262>.
20. de Abajo F. Javier García. Graphene plasmonics: challenges and opportunities // *ACS Photonics*. — 2014. — feb. — Vol. 1, no. 3. — P. 135–152. — URL: <https://doi.org/10.1021/ph400147y>.
21. Graphene plasmonics: physics and potential applications / Shenyang Huang [et al.] // *Nanophotonics*. — 2016. — oct. — Vol. 6, no. 6. — P. 1191–1204. — URL: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2016-0126>.
22. Flatland plasmonics and nanophotonics based on graphene and beyond / Pai-Yen Chen [et al.] // *Nanophotonics*. — 2017. — apr. — Vol. 6, no. 6. — P. 1239–1262. — URL: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2016-0137>.
23. Low Tony, Avouris Phaedon. Graphene plasmonics for terahertz to mid-infrared applications // *ACS Nano*. — 2014. — jan. — Vol. 8, no. 2. — P. 1086–1101. — URL: <https://doi.org/10.1021/nn406627u>.
24. Polaritons in layered two-dimensional materials / Tony Low [et al.] // *Nature Materials*. — 2016. — nov. — Vol. 16, no. 2. — P. 182–194. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat4792>.
25. Mikhailov S. A., Ziegler K. New electromagnetic mode in graphene // *Physical Review Letters*. — 2007. — jul. — Vol. 99, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.99.016803>.
26. Hanson George W. Quasi-transverse electromagnetic modes supported by a graphene parallel-plate waveguide // *Journal of Applied Physics*. — 2008. — oct. — Vol. 104, no. 8. — P. 084314. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.3005881>.
27. A primer on surface plasmon-polaritons in graphene / Yu. V. Bludov [et al.] // *International Journal of Modern Physics B*. — 2013. — apr. — Vol. 27, no. 10. — P. 1341001. — URL: <https://doi.org/10.1142/s0217979213410014>.
28. Kotov O. V., Kol'chenko M. A., Lozovik Yu. E. Ultrahigh refractive index sensitivity of TE-polarized electromagnetic waves in graphene at the interface between two dielectric media // *Optics Express*. — 2013. — may. — Vol. 21, no. 11. — P. 13533. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.21.013533>.
29. Plasmons in waveguide structures formed by two graphene layers / P. I. Buslaev [et al.] // *JETP Letters*. — 2013. — jul. — Vol. 97, no. 9. — P. 535–539. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364013090063>.
30. Multilayer graphene waveguides / D. A. Smirnova [et al.] // *JETP Letters*. — 2014. — jun. — Vol. 99, no. 8. — P. 456–460. — URL: <https://doi.org/10.1134/s002136401408013x>.

31. Plasmons in Cylindrical 2D Materials as a Platform for Nanophotonic Circuits / Irati Soto Lamata [et al.] // ACS Photonics. — 2015. — jan. — Vol. 2, no. 2. — P. 280–286. — URL: <https://doi.org/10.1021/ph500377u>.
32. Transverse-electric plasmonic modes of cylindrical graphene-based waveguide at near-infrared and visible frequencies / Dmitry A. Kuzmin [et al.] // Scientific Reports. — 2016. — may. — Vol. 6, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/srep26915>.
33. Analytical model for plasmon modes in graphene-coated nanowire / Yixiao Gao [et al.] // Optics Express. — 2014. — sep. — Vol. 22, no. 20. — P. 24322. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.22.024322>.
34. Koppens Frank H. L., Chang Darrick E., de Abajo F. Javier García. Graphene Plasmonics: A Platform for Strong Light–Matter Interactions // Nano Letters. — 2011. — jul. — Vol. 11, no. 8. — P. 3370–3377. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl201771h>.
35. Krasavin A. V., Zheludev N. I. Active plasmonics: Controlling signals in Au/Ga waveguide using nanoscale structural transformations // Applied Physics Letters. — 2004. — feb. — Vol. 84, no. 8. — P. 1416–1418. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.1650904>.
36. Exciton-Plasmon-Photon Conversion in Plasmonic Nanostructures / Y. Fedutik [et al.] // Physical Review Letters. — 2007. — sep. — Vol. 99, no. 13. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.99.136802>.
37. Active magneto-plasmonics in hybrid metal–ferromagnet structures / Vasily V. Temnov [et al.] // Nature Photonics. — 2010. — jan. — Vol. 4, no. 2. — P. 107–111. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2009.265>.
38. Enhancement of Multiphoton Emission from Single CdSe Quantum Dots Coupled to Gold Films / Sharonda J. LeBlanc [et al.] // Nano Letters. — 2013. — mar. — Vol. 13, no. 4. — P. 1662–1669. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl400117h>.
39. Abbasi Fereshteh, Davoyan Arthur R, Engheta Nader. One-way surface states due to nonreciprocal light-line crossing // New Journal of Physics. — 2015. — jun. — Vol. 17, no. 6. — P. 063014. — URL: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/17/6/063014>.
40. Kurkin M. I., Bakulina N. B., Pisarev R. V. Transient inverse Faraday effect and ultrafast optical switching of magnetization // Physical Review B. — 2008. — oct. — Vol. 78, no. 13. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.78.134430>.
41. Ultrafast Spin Dynamics in Multisublattice Magnets / J. H. Mentink [et al.] // Physical Review Letters. — 2012. — jan. — Vol. 108, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.108.057202>.
42. Kirilyuk Andrei, Kimel Alexey V, Rasing Theo. Laser-induced magnetization dynamics and reversal in ferrimagnetic alloys // Reports on Progress in Physics. — 2013. — feb. — Vol. 76, no. 2. — P. 026501. — URL: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/76/2/026501>.
43. Kurkin M.I., Orlova N.B. Femtosecond magneto-optics and ultrafast magnetization reversal of ferromagnetic // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2014. — jun. — Vol. 361. — P. 224–231. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.02.079>.

44. Belotelov V. I., Doskolovich L. L., Zvezdin A. K. Extraordinary Magneto-Optical Effects and Transmission through Metal-Dielectric Plasmonic Systems // *Physical Review Letters*. — 2007. — feb. — Vol. 98, no. 7. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.98.077401>.
45. Surface Plasmon Resonance Enhanced Magneto-Optics (SuPREMO): Faraday Rotation Enhancement in Gold-Coated Iron Oxide Nanocrystals / Prashant K. Jain [et al.] // *Nano Letters*. — 2009. — mar. — Vol. 9, no. 4. — P. 1644–1650. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl900007k>.
46. Localized surface plasmon resonance enhanced magneto-optical activity in core-shell Fe–Ag nanoparticles / L. Wang [et al.] // *Journal of Applied Physics*. — 2010. — may. — Vol. 107, no. 9. — P. 09B303. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.3355905>.
47. Enhanced magneto-optical effects in magnetoplasmonic crystals / V. I. Belotelov [et al.] // *Nature Nanotechnology*. — 2011. — apr. — Vol. 6, no. 6. — P. 370–376. — URL: <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.54>.
48. Waveguide-Plasmon Polaritons Enhance Transverse Magneto-Optical Kerr Effect / Lars E. Kreilkamp [et al.] // *Physical Review X*. — 2013. — nov. — Vol. 3, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevx.3.041019>.
49. Photonic crystals with plasmonic patterns: novel type of the heterostructures for enhanced magneto-optical activity / N. E. Khokhlov [et al.] // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2015. — feb. — Vol. 48, no. 9. — P. 095001. — URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/9/095001>.
50. Nonlinear surface magnetoplasmonics in Kretschmann multilayers / Ilya Razdolski [et al.] // *ACS Photonics*. — 2016. — jan. — Vol. 3, no. 2. — P. 179–183. — URL: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.5b00504>.
51. Temnov Vasily V. Ultrafast acousto-magneto-plasmonics // *Nature Photonics*. — 2012. — nov. — Vol. 6, no. 11. — P. 728–736. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.220>.

Information about authors:

Konstantin Konstantinovich Altunin – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: kostya.altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

Elizaveta Evgenievna Volkova — Master’s 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: liza_volkova1999@mail.ru

ORCID iD  0000-0003-2849-7090

Web of Science ResearcherID  AAZ-9027-2020