

## Секция 2

---

### Компьютерные науки и информатика

---

#### 2.1 Теоретическая информатика

Научная статья

УДК 004.658

ББК 22.343

ГРНТИ 20.53.19

ВАК 2.3.8.

PACS 01.40.Di

OCIS 160.3918

MSC 68P05

#### Разработка дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей

К. К. Алтунин , И. А. Шарнина  <sup>1</sup>

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

Поступила в редакцию 30 июня 2023 года

После переработки 30 августа 2023 года

Опубликована 12 декабря 2023 года

---

**Аннотация.** Представлены результаты разработки дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей в системе управления обучением MOODLE. Представлены результаты экспертной оценки дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей.

**Ключевые слова:** курс, дистанционный курс, оптика, графеновая метаповерхность

---

---

<sup>1</sup>E-mail: inna\_sharnina27@mail.ru

## Введение

Работа посвящена разработке дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей.

Целью работы является проектирование дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей.

Задачи исследования:

1. написание обзора литературы по оптике наноструктур с графеновыми метаповерхностями;
2. разработка дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей в системе управления обучением MOODLE.

Объектом исследования является наноструктура с графеновыми метаповерхностями. Предметом исследования является совокупность оптических характеристик наноструктур с графеновыми метаповерхностями, находящихся в поле оптического излучения. В качестве методов исследования выбран графен и материалы графеновых метаповерхностей. В качестве методов исследования используются методы классической и квантовой оптики для проведения теоретических вычислений, а также численные методы расчёта оптических характеристик полубесконечных, плёночных и слоистых сред или наноструктур из оптических материалов и метаматериалов.

Гипотеза исследования состоит в том, что если провести исследование оптических свойств наноструктур с графеновыми метаповерхностями, то можно проектировать нанопокрывтия с графеновыми метаповерхностями, обладающие оптимальными параметрами для просветления различных поверхностей солнечных панелей.

Базой создания информационной поддержки преподавания нанооптики является система управления обучением MOODLE на образовательном портале ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

## Обзор физических свойств графеновых метаповерхностей

Для электронной оптики в графене эффект распространения до сих пор был единственным доступным физическим механизмом. Полученные в результате электронные компоненты, вдохновлённые оптикой, имеют большие размеры и работают при низких температурах, чтобы избежать нарушения баллистических транспортных ограничений. В статье @auxrussian@auxenglish[1] для графеновой электроники вводятся электронные метаповерхности, то есть электронные аналоги оптических метаповерхностей. В статье [1] теоретически реализуются различные углы изгиба электронного луча, а также разделение луча под соответствующими углами в одной и той же метаповерхности со свободным переключением функций путём управления приложенными смещениями затвора. Волновой фронт электронных лучей формируется на расстоянии, намного меньшем баллистического расстояния транспортировки при комнатной температуре, что позволяет создавать электронные устройства на основе оптики, которые могут работать в условиях окружающей среды. Концепция электронной оптики метаповерхностей, основанная на тщательно продуманном дизайне более сложных пространственных фазовых паттернов, также может открыть многообещающие возможности для достижения более привлекательных приложений, таких как электронные металлинзы, голография метаповерхностей, а также технология цифрового кодирования на основе метаповерхностей в графене.

В статье [2] исследуются латеральные силы отдачи, действующие на наночастицы, расположенные вблизи плазмонных платформ, с невзаимным откликом в плоскости. С этой целью мы сначала разрабатываем всеобъемлющую теоретическую основу, основанную на силе Лоренца в рамках приближения Рэлея в сочетании с невзаимными

функциями Грина, а затем выводим приближенные 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 силы отдачи возникает из-за дисбаланса импульсов невзаимных 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.

Резонансные наноструктуры в современной нанофотонике неэрмитовы (с утечкой и потерями) и поддерживают квазинормальные моды. Более того, современные резонаторы часто включают двумерные материалы для использования и резонансного улучшения их нелинейных свойств или обеспечения возможности настройки. Такие материалы усложняют моделирование из-за их бесконечно малой толщины и сильной дисперсии. В статье [3] предлагается формализм для эффективного анализа генерации третьей гармоники в наночастицах и метаповерхностях, включающих двумерные материалы. Он основан на численном расчете квазинормальных мод в наноструктуре, является общим и не делает никаких предварительных предположений относительно количества резонансов, участвующих в процессе преобразования, в отличие от традиционных подходов теории связанных мод в литературе. Возможности платформы демонстрируются на двух выбранных примерах: одиночный рассеиватель и периодическая метаповерхность, включающая графен из-за его высокой нелинейности третьего порядка. В обоих случаях получено превосходное согласие с двухполупериодным нелинейным моделированием. Предлагаемая структура может стать бесценным инструментом для получения физического понимания процесса генерации частоты в нанооптических структурах и предоставления рекомендаций по достижению значительного повышения эффективности генерации третьей гармоники.

В статье [4] показано, что 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 [4] продемонстрирована плазмонная метаповерхность из связанной системы из графена и нанопроволоки, использующей гибридные локализованные поверхностные плазмонные моды массива нанопроволок и графена. Массив нанопроволок делает гибридную моду поверхностного плазмона локализованной, обеспечивая возбуждение в свободном пространстве. Однослойный 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.

Разнообразные оптические границы раздела, обладающие 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, 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 только с ограниченным значением поверхностной магнитной проводимости. В статье [5] 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, в статье [5] идентифицируются 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.

В статье [6] вводится основанное на теории дифракции аналитическое описание свойств метаповерхности, состоящей из массива графеновых субволновых полусфер. Теория описывает взаимодействие света со случайной метаповерхностью, в которой периодичность нарушается случайно поврежденными метаатомами в узлах двумерной периодической решетки. Как численное моделирование, так и эксперименты показывают, что такая метаповерхность нанометровой толщины обладает гигантским широкополосным поглощением в терагерцовом спектральном диапазоне, которое сохраняется даже при повреждении значительной части метаатомов – графеновых полусфер. Более того, дефектное изготовление отдельно стоящей метаповерхности из графена может улучшить поглощающие свойства.

В статье [7] предложена своего рода полностью твердотельная и гибридная электрически и термически перестраиваемая многофункциональная метаповерхностная матрица на основе рисунка графена и конфигурации диоксида ванадия, которая может реализовать функции полосовой заграждения фильтрации, управления лучом и разделения луча.

В статье [8] рассматриваются скрученные двумерные бислои, которые демонстрируют множество интригующих физических явлений из-за возникновения межслойного скручивания и сцепления. Управление «закрученным углом» между двумя мимолетно связанными слоями позволяет гибридизовать поляритоны, а дисперсию поляритонов в этих структурах можно хорошо контролировать. В статье [8] изучается радиационный теплообмен в ближнем поле между двумя наночастицами в присутствии двухслойной гиперболической метаповерхности, которая моделируется как два массива графеновых полосок, расположенных параллельно. Доказано, что топологический переход состояния поверхности под разными углами скручивания (от открытых (гиперболических) к закрытым (эллиптическим) контурам) оказывает существенное влияние на радиационный теплообмен между наночастицами в ближнем поле. Когда как интегральный, так и межслойный углы скручивания отрегулированы до нужных значений, двухслойные графеновые полосы могут канализировать канал передачи энергии наночастиц, тем самым значительно усиливая радиационную теплопередачу в ближнем поле. Достигается коэффициент модуляции выше пяти порядков. В статье [8] также показано, что, когда наночастицы расположены в разных направлениях вдоль скрученной двухслойной системы, радиационный теплообмен в ближнем поле между наночастицами может сильно усиливаться или подавляться. Изменяя химический потенциал и коэффициент заполнения скрученных двухслойных графеновых полос, можно эффективно модулировать радиационную теплопередачу в ближнем поле. В статье [8] раскрывается гибридационный эффект поляритонов на излучательный теплообмен в ближнем поле между наночастицами, дающий некоторую степень свободы (закрученный угол) для управления теплообменом на наноуровне с возможностью эффективного управления энергией.

Линейные волны — это недавно обнаруженные волновые объекты, которые локализованы в двух направлениях и поэтому могут рассматриваться как одномерные аналоги поверхностных волн. Эти волны могут поддерживаться разрывами поверхностного реактивного сопротивления и/или сопротивления низкоразмерных материалов, таких как метаповерхности или графен. В статье [9] изучается более широкий класс неэрмитовых переходов поверхностного импеданса, которые могут поддерживать связанные линейные волны и позволяют исследовать различные одномерные волноводные механизмы в единой структуре. Теоретически продемонстрировано, что в условиях симметрии по времени и четности исключительные точки могут возникать в сценарии действительно плоской оптики, что придает этим волноводным системам привлекательные черты как линейно-волновой физики, так и физики исключительных точек и проливает дополнительный свет на фазовые переходы, существующие в этих системах. Также показано, что требуемые параметры поверхностного импеданса совместимы с достижимыми для типичных моделей фотовозбуждённых графеновых метаповерхностей на терагерцевых частотах. Помимо обеспечения дополнительного понимания физики линейных волн, которая всё ещё находится в зачаточном состоянии, эти результаты открывают путь к интригующим разработкам в малоизученной области неэрмитовой плоской оптики с возможными приложениями, варьирующимися от датчиков до генерации и встроенных микросхем для обработки оптических сигналов.

Метаповерхности, являющиеся двумерными аналогами трёхмерных метаматериалов, в последнее время привлекают большое внимание благодаря своим интересным свойствам, таким как отрицательное преломление, гиперболическая дисперсия и способность манипулировать исчезающим спектром. В статье [10] предложена теоретическая модель радиационного теплообмена в ближней зоне между двумя многослойными системами, состоящими из анизотропных метаповерхностей. В качестве метаповерхности выбран графен с регулируемым дрейфовым током, поскольку он обеспечивает идеальную платформу для поддержки высокой плотности мод вокруг плазмонной частоты. В этой конфигурации возбуждаются несколько невзаимных поверхностных плазмон-поляритонов, что обеспечивает надежный способ переноса энергии в ближнем поле. Полученный в результате теплообмен, которому способствует многослойная структура графена и высокая скорость дрейфового тока, более чем в 36 раз сильнее, чем у однослойной структуры графена без дрейфового тока для того же вакуумного зазора. Регулируя вакуумный зазор и толщину диэлектрической прокладки, этот усиленный эффект можно модулировать в широком диапазоне и даже превратить в подавление. В статье [10] получены результаты, которые обеспечивают мощный способ улучшения и регулирования переноса энергии и, в свою очередь, открывают способ обогатить муровую физику, присущую анизотропным оптическим свойствам метаповерхности.

Усиление взаимодействия света и материи в двумерных материалах с высокими добротностными резонансами в фотонных структурах стимулировало развитие оптических и фотонных устройств. В статье [11] наведён мост между радиационной техникой и связанными состояниями в континууме и представить общий метод управления поглощением света при критической связи через квазисвязанные состояния в континуальном резонансе. В одномодовой двухпортовой системе, состоящей из графена, соединённого с метаповерхностями кремниевых нанодисков, максимальное поглощение 0.5 может быть достигнуто, когда скорость излучения магнитного дипольного резонанса равна скорости рассеяния графена. Кроме того, ширину полосы поглощения можно регулировать более чем на два порядка, от 0.9 нм до 94 нм, путём одновременного изменения параметра асимметрии метаповерхностей, уровня Ферми и количества слоев графена. В статье [11] раскрывается важная роль связанных состояний в континууме излучения в радиационной технике и предлагает многообещающие стратегии управления поглощением

света двумерными материалами для оптических и фотонных устройств следующего поколения, например, излучателей света, детекторов, модуляторов и датчиков.

Метаповерхности, являющиеся двумерными аналогами метаматериалов, обладают беспрецедентными оптическими и тепловыми свойствами, включая суперпланковское тепловое излучение. Недавно было предложено асимметричное структурирование двумерных материалов для возбуждения дополнительных поверхностных гиперболических мод, которые могут усилить перенос энергии излучением. В статье [12] дополнительно изучается влияние симметричных паттернов. Метаповерхности графена выбраны в качестве примера, чтобы продемонстрировать улучшающую роль симметричного формирования рисунка в радиационном тепловом потоке. Флуктуационная электродинамика, включающая теорию матрицы рассеяния со строгим анализом связанных волн, используется для точного расчета теплового потока в ближней зоне. В статье [12] показано, что лучистый тепловой поток между графеновыми метаповерхностями с квадратным узором обеспечивает максимальное 35-кратное усиление по сравнению с листовым аналогом, что намного превышает производительность, основанную на асимметричном узоре. В усиленном тепловом потоке преобладает другой механизм за счёт возбуждения и красного смещения плазмонных поляритонов на поверхности графена с высоким волновым вектором в плоскости. В статье [12] также исследовано влияние подложки, расстояния вакуумного зазора и параметров геометрии поверхности между двумя метаповерхностями с симметричным рисунком. В статье [12] открывается альтернативный путь для улучшения и модуляции радиационного теплообмена на основе метаповерхности для эффективного управления тепловой энергией на микромасштабах и наномасштабах.

В статье [13] продемонстрирована схема для резкого увеличения генерации второй и третьей гармоник в метаповерхности графен-изолятор-графен. Ключевой особенностью подхода является наличие явления двойного резонанса, а именно, метаповерхность спроектирована так, чтобы иметь фундаментальные плазмонные резонансы как на основной частоте, так и на более высокой гармонике. Важно отметить, что усовершенствованный процесс нелинейной генерации частоты можно легко переключать в той же системе между второй и третьей гармониками. Этот тип графеновой метаповерхности может открыть новые возможности для разработки новых ультракомпактных и многочастотных активных фотонных наноустройств.

Гетероструктуры Ван-дер-Ваальса, состоящие из атомарно тонких слоёв с вращательными смещениями, такие как скрученный двухслойный графен, имеют интересные структурные муаровые сверхрешётки. Из-за квантовой связи между скрученными атомными слоями взаимодействие света и материи по своей природе кирально; как таковые, они обеспечивают многообещающую платформу для киральных плазмонов в экстремальных наномасштабах. Однако, хотя межслойная квантовая связь может быть значительной, её влияние на киральные плазмоны всё ещё остаётся неуловимым. В статье [14] представлены общие решения полных уравнений Максвелла для киральных плазмонов в скрученных атомных бислоях с учетом межслойной квантовой связи. В статье [14] найдено, что закрученные атомные бислои имеют прямое соответствие киральной метаповерхности, которая помимо общей поверхностной электропроводности обладает киральной и магнитной поверхностной проводимостью. Иными словами, межслоевая квантовая связь в скрученных ван-дер-ваальсовых гетероструктурах может способствовать созданию различных (например, бианизотропных) атомарно-тонких метаповерхностей.

В статье [15] представлено описание сверхтонкого графенового метаэкрана, обладающего дисперсионной оптической активностью в раннем терагерцовом спектре. Конструкция метаэкрана состоит из периодически вытравленных  $L$ -образных пустот на

графеновой подложке, подкреплённой проводящей плоскостью. Особая конструкция элементарной ячейки основана на хиральности и приводит к сильно асимметричному излучению плазмон-поляритонных поверхностных токов, что приводит к линейному и круговому дихроизму. Следовательно, падающие электрические поля линейной или круговой поляризации эффективно поглощаются метаповерхностью в различных пропорциях. Следовательно, метаповерхность принимает полуволновое и четвертьволновое поведение пластины в разных частях отражённого оптического спектра. В частности, с помощью полноволнового моделирования в статье [15] показано, что дихроичный метаэкран поддерживает идеальное преобразование линейной поляризации в круговую (круговой дихроизм) в двух соседних терагерцевых частотных диапазонах. В двух других терагерцевых диапазонах он поворачивает входящий линейно поляризованный волновой вектор на  $90^\circ$  (линейный дихроизм). Кроме того, поскольку графен имеет переменную зависимость показателя преломления от своего химического потенциала, дисперсионные характеристики могут быть смещены в сторону соседних частот в пределах раннего терагерцевого спектра. Далее, в статье [15] демонстрируется стабильный по углу отклик для углов падения от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ . Настраиваемые характеристики линейного и кругового дихроизма хорошо подходят для приложений в области зондирования, визуализации и спектроскопии на терагерцевых частотах.

В статье [16] исследуются необычные невязимые и бездифракционные свойства поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся в метаповерхностях на основе графена с дрейфовым смещением. В статье [16] показано, что приложение дрейфового тока к графеновому листу приводит к чрезвычайно асимметричным модальным дисперсиям в плоскости, от терагерцевых до инфракрасных частот, связанных с плазмонами с низкими потерями (высокими потерями и сверхвысоким ограничением), движущимися вдоль (против) смещения. Поразительно, но действительно однонаправленному распространению волны препятствует внутренняя нелокальная реакция графена — механизм, который формирует поток энергии по поверхности. В статье [16] также показано, что высоконаправленные гиперболические плазмоны, полностью невосприимчивые к обратному рассеянию, распространяются наклонно вдоль дрейфа в наноструктурированном графене. Наконец, в статье [16] обсуждается, как на этой платформе можно использовать спин-орбитальные взаимодействия для эффективного запуска коллимированных плазмонов в одном направлении при сохранении гигантских невязимых откликов. В статье [16] полученные результаты предлагают парадигму возбуждения, коллимации, управления и обработки поверхностных плазмонов в широком диапазоне частот.

Метаповерхности, которые являются двумерными аналогами метаматериалов, недавно привлекли к себе большое внимание благодаря своим удивительным свойствам, в том числе отрицательному преломлению, гиперболической дисперсии и манипулированию исчезающим спектром. В статье [17] предлагается теоретическая модель радиационного теплообмена в ближнем поле между двумя наночастицами в присутствии анизотропной метаповерхности. В частности, метаповерхность моделируется как массив графеновых полос, что является идеальной платформой для реализации любой топологии метаповерхности, от изотропной до гиперболической. Излучательный теплообмен в ближнем поле между двумя наночастицами значительно усиливается, когда они помещаются вблизи графеновых полосок, и регулируется на несколько порядков. В этой конфигурации анизотропного поверхностного плазмон-поляритона, поддерживаемые графеновыми полосками, возбуждаются и обеспечивают новый канал для переноса энергии в ближнем поле. Зависимость проводимости между двумя наночастицами от ориентации, параметров структуры, химического потенциала полосок графена и межчастичных расстояний или расстояний между частицами и поверхностью анализируется путём чёткого определения характеристик анизотропных поверхностных плазмон-поляритонов,

таких как дисперсионные соотношения, длина распространения и длина затухания. В статье [17] полученные результаты демонстрируют мощный метод регулирования переноса энергии в системах частиц и позволяют исследовать анизотропные оптические свойства метаповерхности на основе измеренных свойств теплопередачи.

В статье [18] исследовано рассеяние на диэлектрической нанопроволоке, покрытой спиральными графеновыми полосками (нанолентами), для волны с двойной поляризацией при наклонном падении. В длинноволновом приближении спиральные полоски рассматриваются как однородный слой с усредненной тензорной проводимостью. В статье [18] показано, что характеристики известных поверхностных плащей в виде монослоя графена, аксиальных и азимутальных полос графена могут ухудшаться в широком диапазоне углов падения. Чтобы преодолеть эту проблему, спиральные графеновые полоски предлагаются в качестве усовершенствованной метаповерхности для двойной поляризации всеугловой маскировки диэлектрической нанопроволоки в терагерцовом диапазоне. Установлено, что такая метаповерхность подавляет рассеяние от нанопроволоки более эффективно, чем от монослоя графена, независимо от угла падения волны. Кроме того, двойная поляризация диэлектрической нанопроволоки во всех углах может быть широко настроена по частоте с параметрами спиральных графеновых полос.

В статье [19] описаны результаты исследования одномерных и двумерных метаповерхностей графена, которые гомогенизируются как на основной частоте, используя мощный метод гомогенизации, так и на второй гармонике. В обоих случаях наблюдается отличное согласие между предсказаниями метода гомогенизации и предсказаниями, основанными на строгих численных решениях уравнений Максвелла. Затем метод гомогенизации используется для демонстрации того, что благодаря двойному резонансному механизму возбуждения плазмонов, который приводит к сильному одновременному усилению поля на основной частоте и второй гармонике, эффективная восприимчивость графеновых метаповерхностей второго порядка может быть увеличена более чем на три порядка по сравнению с собственной восприимчивостью второго порядка листа графена, помещенного на ту же подложку. Кроме того, в статье [19] изучается влияние результатов на разработку новых активных наноприборов, включающих графеновые структуры с наноструктурой.

Фарадеевское вращение является фундаментальным свойством, присутствующим во всех невзаимных оптических элементах. В терагерцовом диапазоне графен демонстрирует сильное фарадеевское вращение; к сожалению, он ограничен частотами ниже циклотронного резонанса. В статье [20] экспериментально показано, что в специально разработанных метаповерхностях можно использовать магнитоплазмоны, чтобы обойти это ограничение. В статье [20] найдено превосходное согласие между теорией и экспериментом и обеспечиваем физическое понимание и предсказания этих явлений. Наконец, в статье [20] демонстрируется сильная перестраиваемость этих метаповерхностей с помощью смещения электрического и магнитного полей.

В статье [21] представлен вывод аналитических компонент  $S$ -матриц для произвольных плоских дифракционных структур и метаповерхностей в области Фурье. Полученные общие формулы для компонент  $S$ -матрицы могут применяться как в постановках в декартовой, так и в криволинейной метрике. Численный метод, основанный на этих результатах, может извлечь выгоду из всех предыдущих улучшений методов области Фурье. Кроме того, в статье [21] приводятся выражения для расчета  $S$ -матрицы в случае периодически гофрированных слоёв двумерных материалов, которые справедливы для произвольных отношений глубины гофра к периоду. В качестве примера полученные уравнения используются для моделирования возбуждения резонансной решёткой графеновых плазмонов и влияния прослойки кремнезема на соответствующие кривые отражения.



В статье [22] представлена метаповерхность на основе графена, которую можно активно настраивать между различными режимами работы, такими как аномальное управление и фокусировка луча, маскировка и иллюзорная оптика, путём применения электростатического стробирования без изменения геометрии метаповерхности. Метаповерхность спроектирована путем размещения графеновых лент на резонаторе с диэлектрической полостью, где взаимодействие между геометрическими плазмонными резонансами в лентах и резонансами Фабри-Перо в полости используется для достижения фазового сдвига на  $2\pi$ . В качестве доказательства концепции демонстрируется, что волновой фронт поля, отраженный от треугольной выпуклости, покрытой метаповерхностью, может быть настроен путём приложения электрического смещения так, чтобы он напоминал фронт голой плоскости и сферического объекта. Кроме того, показана отражательная фокусировка и изменение направления отражения для вышеупомянутых случаев.

Успешная реализация метаматериалов и метаповерхностей требует разумного выбора составляющих элементов. В статье [23] демонстрируется реализация изменяющихся во времени метаматериалов в режиме терагерцовой частоты с использованием микропроводов, обернутых графеном, в качестве строительных блоков и модуляции проводимости графена с помощью внешнего электрического затвора. Эти элементы позволяют улучшить взаимодействие света и графена за счёт использования оптических резонансов, связанных с рассеянием Ми, что обеспечивает большую настраиваемость и глубину модуляции. В статье [23] разрабатывается полуаналитическая основа, основанную на формулировке матрицы переходов, для моделирования и анализа периодических и аperiodических массивов таких изменяющихся во времени строительных блоков. Предлагаемый метод проверяется на полноволновых численных результатах, полученных с использованием метода конечных разностей во временной области. Он представляет собой идеальный инструмент для математического синтеза и анализа метаматериалов пространственно-временного градиента, устраняя необходимость в дорогостоящих численных моделях. Более того, это позволяет более широко исследовать экзотические физические явления пространственно-временного рассеяния в метаматериалах с временной модуляцией. В статье [23] применяется этот метод для изучения роли параметров модуляции в генерации частотных гармоник и их возникающих волновых фронтов. В статье [23] продемонстрировано несколько потенциальных применений таких платформ, включая преобразование частоты, голографическую генерацию частотных гармоник и пространственно-временные манипуляции со светом. Представленные результаты дают ключевую физическую информацию для разработки функциональных метаустройств с временной модуляцией с использованием различных строительных блоков и открывают новые направления в зарождающейся парадигме метаматериалов с временной модуляцией.

В статье [24] исследована оптическая активность ахиральных немагнитных одноосных метаповерхностей, обусловленная внешней хиральностью, возникающей из-за взаимной ориентации их оси анизотропии и плоскости падения света. Гиперболический режим метаповерхностей проявляется в усилении вращения поляризации в проходящем свете и в эффекте гигантского усиления в отражённом свете. Переход к этому режиму зависит от частоты и имеет топологическую природу. Ключевая роль в повышении оптической активности принадлежит  $\sigma$ -околополносному и гиперболическому  $\sigma$ -околонулевому режимам метаповерхностей. В статье [24] рассмотрены гиперболические метаповерхности на основе графеновых полос или металлических дисков и тонкой плёнки черного фосфора в качестве естественного гиперболического слоя. Эффективность предсказанных эффектов зависит от реализации метаповерхности и роли подложки. Варьируя параметры метаповерхности и выбирая физические реализации, можно

сконструировать такой гиперболический поляризатор метаповерхности для терагерцового, инфракрасного и видимого рабочих диапазонов. В статье [24] получены результаты, которые могут помочь улучшить поляризаторы метаповерхностей, используя их в гиперболическом режиме.

В статье [25] обсуждается возможность канализации, коллимации и туннелирования плазмонов над ультратонкими метаповерхностями, что возможно благодаря крайней анизотропии в их сложной диадечной проводимости. Взаимодействие между анизотропией, почти нулевой проводимостью и потерями используется здесь для получения общих условий канализации плазмонов и эффективного переноса энергии. В статье [25] также демонстрируется, как внутренняя плоскостная анизотропия черного фосфора может обеспечить естественную платформу для разработки этих условий, демонстрируя важные преимущества по сравнению с изотропными плазмонными материалами. В статье [25] получены результаты, которые имеют значение для плазмонных датчиков, плоских гиперлинз и плазмонного управления поверхностью, и они подчеркивают потенциал двумерных материалов помимо графена.

Плазмонные решётки представляют собой парадигмальный пример широкого спектра приложений, доступных благодаря плазмоники. В то время как субволновые металлические решетки находят применение в оптическом биодатчике и фотогальванике, атомарно тонкие решетки, получаемые путём периодического легирования монослоя графена, служат метаповерхностями для контроля терагерцового излучения. В статье [26] показано, как эти два экземпляра плазмонных решёток наследуют свои спектральные свойства от нижележащей пластины с трансляционной симметрией. В статье [26] разработан аналитический формализм для точного получения спектра мод решёток, который обеспечивает глубокое физическое понимание.

Графен стал многообещающей платформой для создания различных терагерцовых метаповерхностей, поддерживающих электрически настраиваемые плазмонные возбуждения глубокой субволновой длины. В статье [27] вводится широкополосная метаповерхность графена, основанная на кривой Гильберта, непрерывном, заполняющем пространство фрактале. В статье [27] демонстрируется усиление поглощения графена в широкой полосе частот (0.5 – 60 ТГц) со средним уровнем поглощения более 20%. Благодаря непрерывному характеру узоров метаповерхности как уровнем поглощения, так и шириной полосы можно управлять электрически, изменяя концентрацию графеновых носителей заряда.

Используя управляемый резонанс фотонного гиперкристалла, являющегося периодической структурой, которая сочетает в себе свойства гиперболических материалов и фотонных кристаллов — в статье [28] численно продемонстрирован идеальный поглотитель, состоящий из пластины фотонного гиперкристалла, диэлектрической прокладки и заднего отражателя. Управляемый резонанс фотонной гиперкристаллической пластины создаёт усиление поля и удержание его в толще глубокой субволновой области; поэтому ультратонкая фотонная гиперкристаллическая пластина служит двумерным резонатором, который можно точно рассматривать как метаповерхность. В статье [28] показано, что идеальный поглотитель эквивалентен метаповерхностному экрану Солсбери, где метаповерхность, образованная пластиной фотонного гиперкристалла, обеспечивает соответствующую электрическую проводимость слоя, необходимую для критической связи. В статье [28] также представлены примеры сочетания идеального поглотителя с графеном для создания оптических модуляторов и улучшения поглощения в графеновых фотодетекторах.

Локальный фазовый контроль электромагнитных волн, лежащий в основе разнообразных фотонных приложений, таких как создание голограмм, поляризация и манипулирование волновым фронтом, имеет фундаментальное значение в фотонных исследова-

дованиях. Однако доступные в настоящее время громоздкие пассивные фазовые модуляторы с ограниченным диапазоном представляют собой препятствие для фотонных приложений. В статье [29] предложен новый механизм для достижения широкого диапазона фазовой модуляции с графеном, используемым в качестве настраиваемых потерь для управления переходом резонатора с недостаточного демпфирования на избыточное демпфирование. Основываясь на этом механизме, в статье [29] представлена широко перестраиваемая фазовая модуляция в терагерцовом режиме, реализованная в сверхтонких отражающих метаповерхностях графена с затвором. Модель однопортового резонатора, поддерживаемая полноволновым моделированием, объясняет основную физику обнаруженной экстремальной фазовой модуляции и указывает общие стратегии проектирования настраиваемых фотонных устройств. В качестве примера в статье [29] демонстрируется перестраиваемый терагерцовый модулятор поляризации с графеновой метаповерхностью. Результаты, представленные в статье [29], устанавливают возможность применения фотоники на основе активной фазовой манипуляции.

В статье [30] представлен важный подход для усиления нелинейного отклика графена за счёт его резонансной связи с плазмонной метаповерхностью через каскадные резонансы Фано. Такая гибридная метаповерхность поддерживает два типа субрадиантных резонансных мод: асимметричные моды структурированных элементов метаматериала («метамолекул») и графеновых плазмонов, проявляющих сильную взаимную связь и избегающих дисперсионного пересечения. В статье [30] демонстрируется, что перестраиваемость графеновых плазмонов способствует сильному взаимодействию между субизлучающими модами, изменяя спектральное положение и время жизни резонансов Фано. В статье [30] выявлено, что сильное резонансное взаимодействие в сочетании с субволновой локализацией плазмонов приводит к усилению нелинейного отклика и высокой эффективности генерации второй гармоники.

В статье [31] изучается электронная зонная структура и оптическая проводимость туннельно-связанного массива графеновых нанолент. Показано, что из-за связи электронных краевых состояний для зигзагообразной структуры нанолент поверхность Ферми может стать гиперболой аналогично случаю слоистых металл-диэлектрических структур, где гиперболические изочастотные контуры возникают из-за связи локализованных поверхностных плазмон-поляритонов. Кроме того, показано, что для обоих типов края ленты оптический отклик структуры может характеризоваться тензором одноосной проводимости, имеющим главные компоненты разных знаков. Таким образом, туннельно-связанный массив нанолент можно рассматривать как перестраиваемую гиперболическую метаповерхность.

В статье [32] исследуется необычный электромагнитный отклик ультратонких анизотропных  $\sigma$ -близких к нулю одноосных метаповерхностей, демонстрируя экстремальные топологические переходы — от замкнуто-эллиптических к открыто-гиперболическим — для распространения поверхностных плазмонов, связанные с драматическим изменением локальной плотности состояний. Предлагаемые метаповерхности могут быть реализованы с использованием наноструктурированных монослоёв графена и открывают беспрецедентные возможности для экстремального удержания света и необычного распространения и направления в сочетании с большой возможностью настройки с помощью электрического смещения.

Периодические структуры, обладающие субволновыми характеристиками, играют важную роль в универсальном и эффективном управлении электромагнитными волнами от радиочастот до оптики. В статье [33] теоретически оцениваются потенциальные приложения и характеристики электромагнитных метаповерхностей, изготовленных из графена с периодическим рисунком. В статье [33] представлено несколько графеновых метаповерхностей, тем самым демонстрируя, что такие сверхтонкие поверхности мож-

но использовать для динамического управления оптическим отражением, поглощением или поляризацией электромагнитных волн. Действительно, благодаря физическим свойствам графена характеристики структуры с точки зрения резонансных частот и ширины полосы меняются при изменении электростатических полей смещения. Чтобы продемонстрировать применимость концепции в различных диапазонах частот, были предоставлены примеры в диапазоне от микроволнового до инфракрасного, что соответствует характеристикам графена с масштабом длины от нескольких миллиметров до примерно микрометра соответственно. Результаты получены с использованием полновекторной полуаналитической численной методики, разработанной для точного моделирования исследуемых многослойных периодических структур на основе графена.

В статье [34] представлена новая стратегия управления временной эволюцией квантовой системы в наномасштабе. Метод, предложенный в статье [34], основан на использовании графеновых плазмонов, частота которых может быть электрически настроена с помощью внешних затворов. Квантовые эмиттеры (например, квантовые точки), расположенные вблизи графеновой наноструктуры, подвержены сильному взаимодействию с плазмонами этого материала, таким образом претерпевая изменения во времени их взаимодействия и квантовой эволюции, которые диктуются внешними управляющими напряжениями. Эта схема открывает новый путь к реализации устройств квантовой оптики в надёжной твердотельной среде графена.

Статья [35] посвящена всестороннему исследованию эффектов квантовой оптики для квантовых излучателей в ближнем поле наночастиц. В простой модели двухуровневого квантового излучателя, расположенного вблизи плазмонной наночастицы, анализируются механизмы изменения скорости радиационного и безызлучательного распада и обсуждается распределение интенсивности ближнего поля и поляризации вокруг наночастицы. Это распределение имеет сложную структуру, существенно зависит от поляризации поля внешнего излучения и параметров плазмонных резонансов наночастицы. Проанализированы квантово-оптические эффекты в системе (наночастица + квантовый излучатель + внешнее лазерное поле), в том числе ближнепольная модификация спектра резонансной флуоресценции квантового излучателя, эффекты группировки и антигруппировки и эффекты квантовой статистики фотонов в спектре, формирование сжатых световых состояний и квантово-запутанных состояний в таких системах.

В статье [36] проанализированы спектральные свойства редуцированных квантовых флуктуаций, возникающих из-за одиночного двухуровневого излучателя, связанного с оптической наноструктурой. Приведено замкнутое выражение для спектра сжатия в этой гибридной системе, включающее эффект дополнительной фазовой декогерентности. В статье [36] рассматривается металлическая наноантенна, чтобы проиллюстрировать, как гибридная система может увеличить пропускную способность и преодолеть ограничения генерации такого спектрального сжатия с точки зрения интенсивности управляющего поля и эффекта чистой дефазировки.

Проведённый обзор литературы показал актуальность исследования физических свойств графеновых метаповерхностей.

## Результаты

Опишем результаты разработки информационной системы, предназначенной для поддержки преподавания учебной дисциплины «Оптика графеновых метаповерхностей», в процессе практико-ориентированной подготовки педагога в магистратуре педагогического университета в условиях смешанного обучения.

Рассматриваются результаты разработки модульной структуры и избранных элементов дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей в системе управления обучением MOODLE. Проведено описание основных функциональных возможно-

стей дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей, созданного в системе управления обучением MOODLE. Обсуждаются возможности модульной структуры дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей. Дистанционный курс по оптике графеновых метаповерхностей посвящён изучению физических основ теории нанопокровтий с графеновыми метаповерхностями.

Целью исследования данной части работы является описание процесса разработки дистанционного курса «Оптика графеновых метаповерхностей».

Задача данной части работы состоит в разработке модульной структуры и материалов дистанционного курса «Оптика графеновых метаповерхностей» в системе управления обучением MOODLE.

Объектом исследования в данной части работы является дистанционный курс «Оптика графеновых метаповерхностей».

Предметом исследования в данной части работы в части создания дистанционного курса является процесс создания информационных и контролирующих элементов дистанционного курса «Оптика графеновых метаповерхностей» в системе управления обучением MOODLE.

Гипотеза исследования в данной части работы состоит в том, что если использовать дистанционный курс «Оптика графеновых метаповерхностей» в системе MOODLE, то можно оптимизировать процесс преподавания учебной дисциплины «Оптика графеновых метаповерхностей».

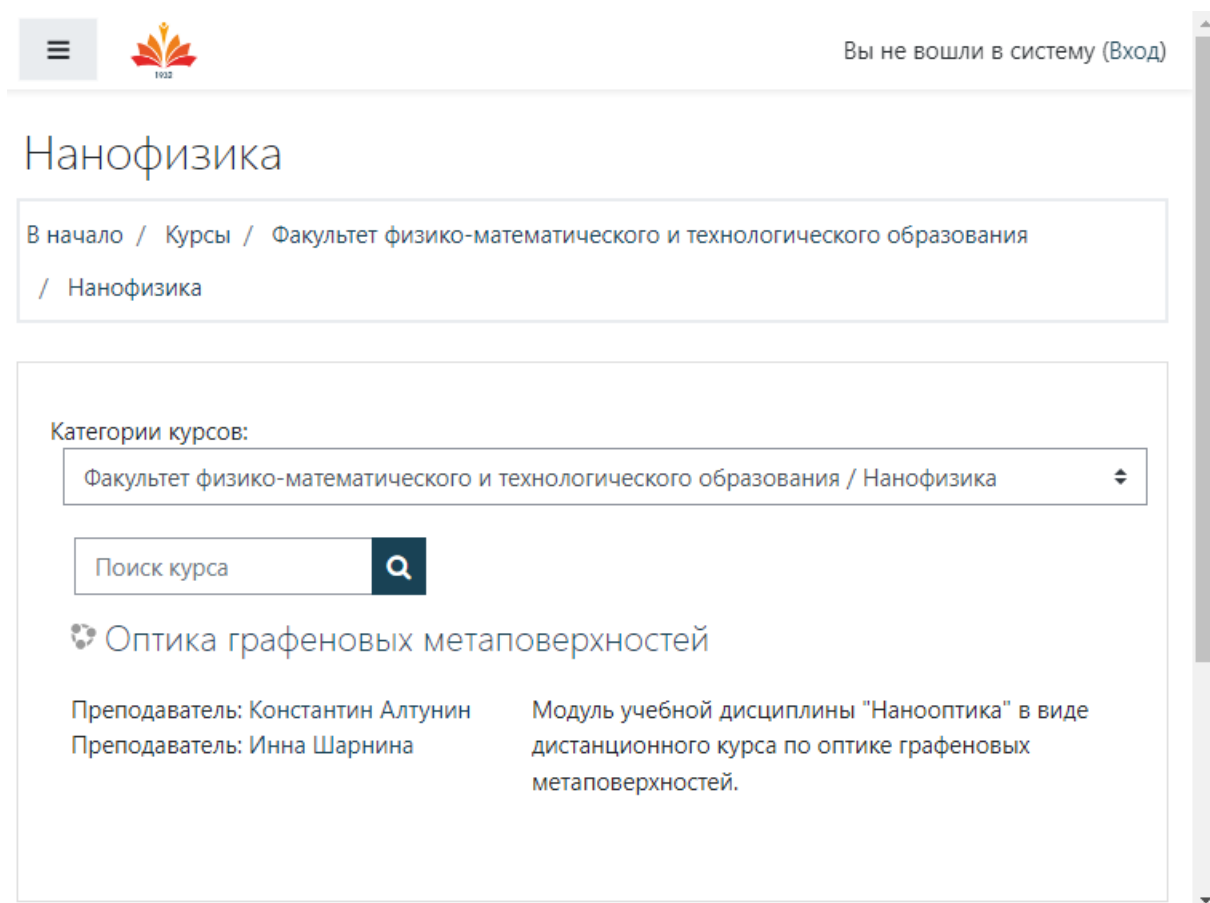


Рис. 1. Входная страница дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

На рис. 1 изображена входная страница дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обу-

чением MOODLE на образовательном портале университета. На входной странице дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей» содержатся сведения о названии дистанционного курса, преподавателях курса, вводном описании курса.

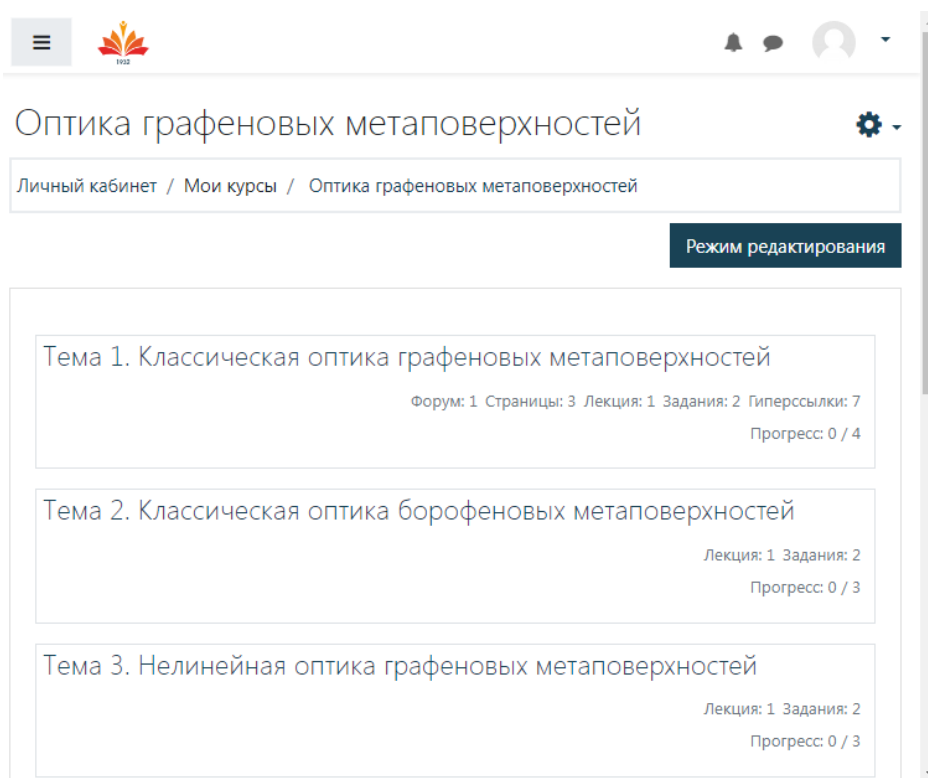


Рис. 2. Страница, содержащая первую часть модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

На рис. 2 изображена страница, содержащая первую часть модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета. Первой темой в первой части модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей» является тема по классической оптике графеновых метаповерхностей. Второй темой в первой части модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей» является тема по классической оптике борофеновых метаповерхностей. Третьей темой в первой части модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей» является тема по нелинейной оптике графеновых метаповерхностей.

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

Четвёртой темой во второй части модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика нанопокровтий» является тема по нелинейной оптике борофеновых метаповерхностей. Пятой темой во второй части модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей» является тема по квантовой оптике графеновых метаповерхностей. Шестой темой во второй части модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей» является тема по квантовой оптике борофеновых метаповерхностей.

На рис. 4 изображена страница, содержащая элементы первой темы дистанционного

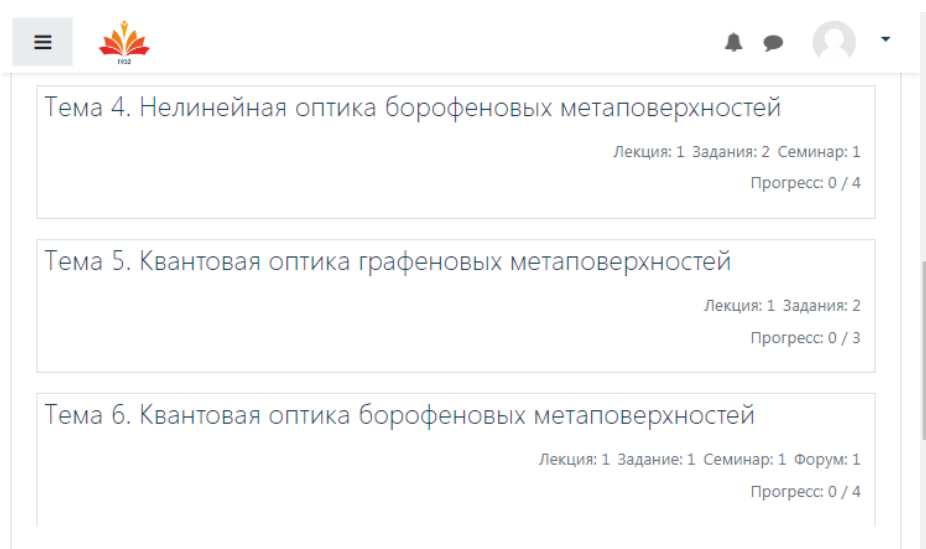


Рис. 3. Страница, содержащая вторую часть модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

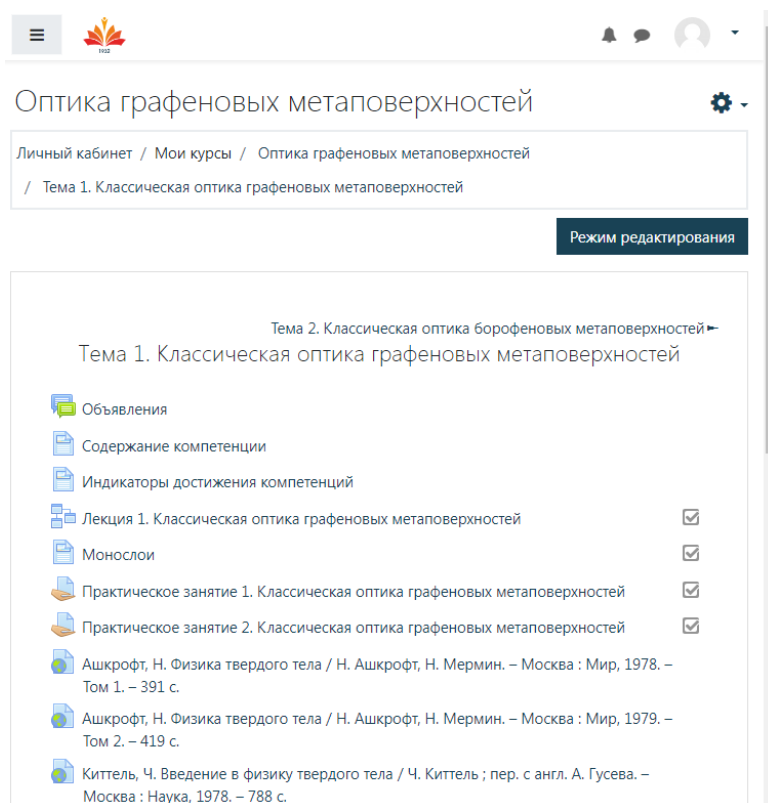


Рис. 4. Страница, содержащая элементы первой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

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

На рис. 6 изображена страница, содержащая элементы третьей темы дистанционного

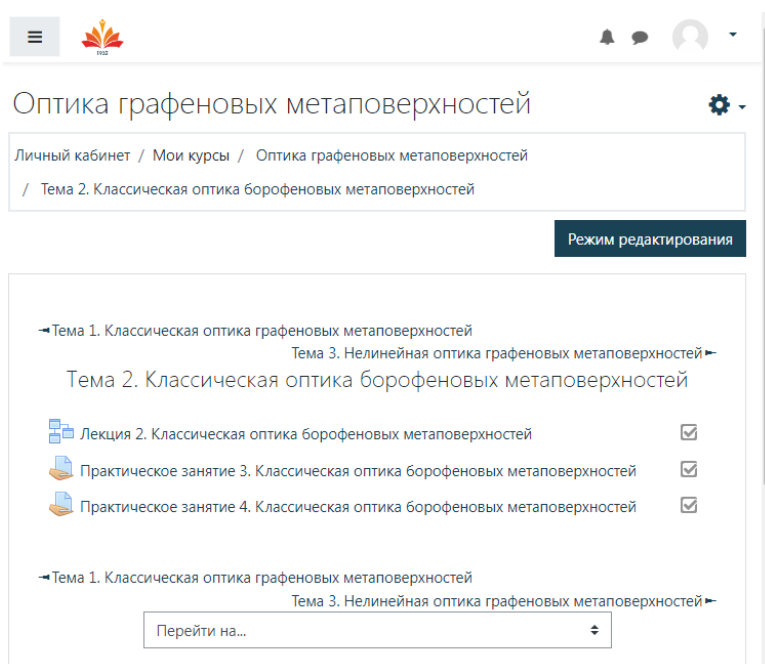


Рис. 5. Страница, содержащая элементы второй темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

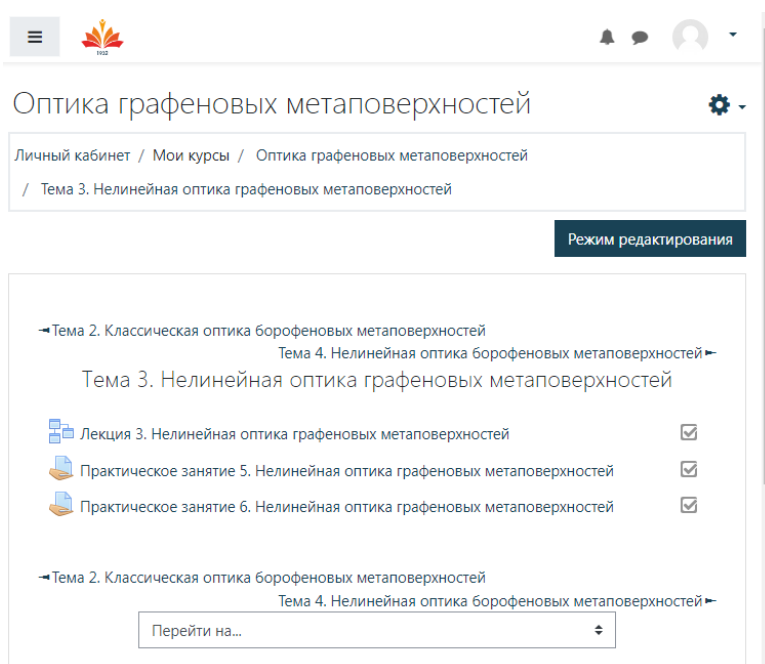


Рис. 6. Страница, содержащая элементы третьей темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

На рис. 7 изображена страница, содержащая элементы четвёртой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

На рис. 8 изображена страница, содержащая элементы пятой темы дистанционного



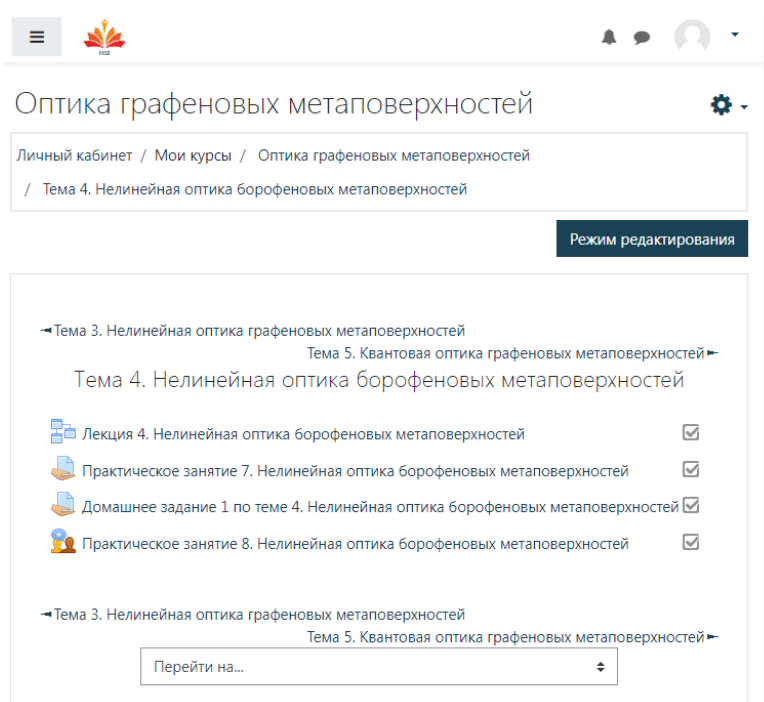


Рис. 7. Страница, содержащая элементы четвёртой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

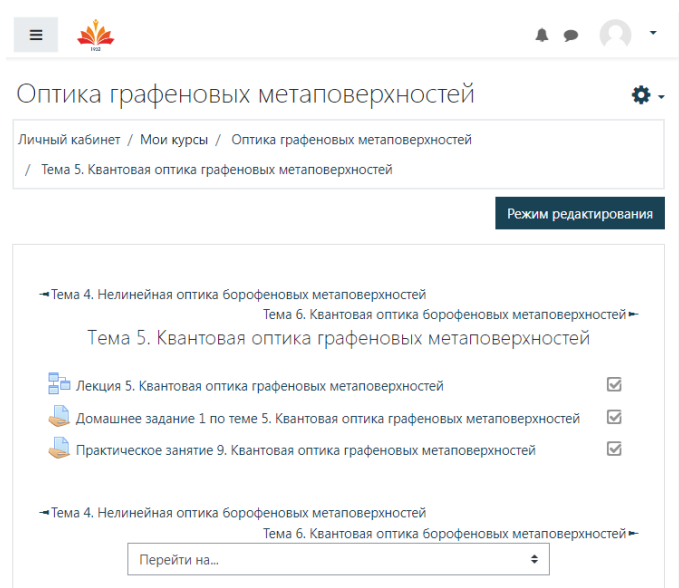


Рис. 8. Страница, содержащая элементы пятой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

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

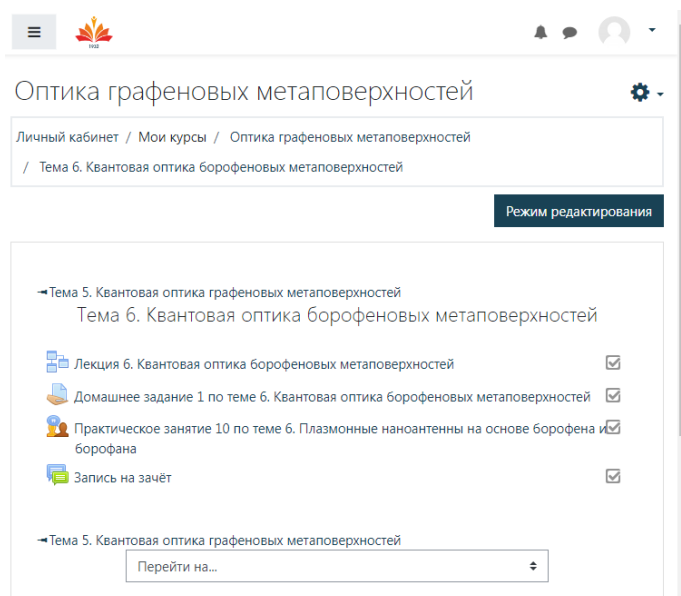


Рис. 9. Страница, содержащая элементы шестой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

## Результаты экспертной оценки дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей

Экспертная оценка дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей 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 6 баллов, за дизайн курса выставил 7 баллов, за интерфейс курса выставил 6 баллов, за диагностику курса выставил 6 баллов, за организацию самостоятельной работы курса выставил 8 баллов, за соблюдение авторских прав в курсе выставил 9 баллов.

Эксперт 2 за структуру курса выставил 9 баллов, за интерактивность курса выставил 6 баллов, за навигацию курса выставил 10 баллов, за дизайн курса выставил 6 баллов, за интерфейс курса выставил 7 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 7 баллов, за интерактивность курса выставил 8 баллов, за навигацию курса выставил 7 баллов, за дизайн курса выставил 6 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 8 баллов.

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

Эксперт 5 за структуру курса выставил 8 баллов, за интерактивность курса выставил 7 баллов, за навигацию курса выставил 8 баллов, за дизайн курса выставил 6

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

Используя экспертные отметки по каждому критерию оценивания дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей вычислим средние значения по каждому критерию оценивания. Среднее значение отметок экспертов за структуру дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей составило 8.4. Среднее значение отметок экспертов за интерактивность дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей составило 7.5. Среднее значение отметок экспертов за навигацию дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей составило 7.7. Среднее значение отметок экспертов за дизайн дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей составило 6.7. Среднее значение отметок экспертов за интерфейс дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей составило 7.5. Среднее значение отметок экспертов за диагностику дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей составило 6.6. Среднее значение отметок экспертов за организацию самостоятельной работы дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей составило 6.8. Среднее значение отметок экспертов за соблюдение авторских прав в дистанционном курсе по оптике графеновых метаповерхностей составило 9.1. Сумма средних значений по восьми критериям составила 60.3. Если перевести рейтинговую отметку по курсу в проценты, то получим значение, равное 60.3%, что соответствует конструктивному уровню дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей.

Результаты экспертного оценивания разработанного дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей в системе управления обучением MOODLE позволяют выявить достоинства и недостатки проектирования курса по оптике графеновых мета-

поверхностей.

Результаты экспертного оценивания дистанционного курса подтверждают необходимость использования дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей, созданного в системе управления обучением MOODLE, в системе обучения физике на педагогическом направлении подготовки в педагогическом университете. Экспертами дана положительная оценка разработанного дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

## Заключение

Разработка и изучение наноструктур с графеновыми материалами имеет важнейшее значение для современной оптики и оптоэлектроники, поскольку такие наноструктуры обладают уникальным набором химических, физических, физико-механических и эксплуатационных свойств. Физические характеристики наноструктур с графеновыми материалами сложным образом зависят от структурных параметров, таких как состав, форма и размер включений (наночастиц, нанопроволок, нанослоёв, квантовых наносистем), распределение их по размерам, равномерность расположения включений в объёме матрицы наноструктурного материала.

По результатам работы можно сделать вывод о том, что разработанный дистанционный курс по оптике графеновых метаповерхностей позволяет проводить обучение по оптике графеновых метаповерхностей в дистанционной форме и смешанной форме в университете.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если провести исследование оптических свойств наноструктур с графеновыми метаповерхностями, то можно проектировать нанопокртия с графеновыми метаповерхностями, обладающие оптимальными параметрами для просветления различных поверхностей солнечных панелей, подтверждена полностью.

Дистанционный курс по оптике графеновых метаповерхностей апробирован и внедрён в педагогическую практику университета. Использование дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей открывает возможность реализации смешанного обучения по нанооптике в университетах.

## Список использованных источников

1. Electron metasurfaces in graphene / Ruihuang Zhao [et al.] // Physical Review B. — 2023. — apr. — Vol. 107, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.155404>.
2. 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>.
3. Christopoulos Thomas, Kriezis Emmanouil E., Tsilipakos Odysseas. Multimode non-Hermitian framework for third harmonic generation in nonlinear photonic systems comprising two-dimensional materials // Physical Review B. — 2023. — jan. — Vol. 107, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.035413>.
4. 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>.

5. 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>.
6. Random Graphene Metasurfaces: Diffraction Theory and Giant Broadband Absorptivity / Andrey Novitsky [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2022. — apr. — Vol. 17, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.17.044041>.
7. Electrically and thermally tunable multifunctional terahertz metasurface array / Yue Wang [et al.] // *Physical Review A*. — 2022. — mar. — Vol. 105, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.105.033520>.
8. Anisotropic radiative heat transfer between nanoparticles mediated by a twisted bilayer graphene grating / Shui-Hua Yang [et al.] // *Physical Review B*. — 2021. — sep. — Vol. 104, no. 12. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.104.125417>.
9. Exceptional points in flat optics: a non-Hermitian line-wave scenario / Massimo Moccia [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2021. — jun. — Vol. 15, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.15.064067>.
10. Enhancement and active mediation of near-field radiative heat transfer through multiple nonreciprocal graphene surface plasmons / Cheng-Long Zhou [et al.] // *Physical Review B*. — 2020. — dec. — Vol. 102, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.102.245421>.
11. Controlling light absorption of graphene at critical coupling through magnetic dipole quasi-bound states in the continuum resonance / Xing Wang [et al.] // *Physical Review B*. — 2020. — oct. — Vol. 102, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.102.155432>.
12. Enhanced near-field radiative heat transport between graphene metasurfaces with symmetric nanopatterns / Yizhi Hu [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2020. — oct. — Vol. 14, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.14.044054>.
13. You Jian Wei, Panoiu Nicolae C. Tunable and dual-broadband giant enhancement of second-harmonic and third-harmonic generation in an optimized graphene-insulator-graphene metasurface // *Physical Review B*. — 2020. — sep. — Vol. 102, no. 12. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.102.121403>.
14. Chiral Plasmons with Twisted Atomic Bilayers / Xiao Lin [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2020. — aug. — Vol. 125, no. 7. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.125.077401>.
15. Amin M., Siddiqui O., Farhat M. Linear and circular dichroism in graphene-based reflectors for polarization control // *Physical Review Applied*. — 2020. — feb. — Vol. 13, no. 2. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.13.024046>.
16. Correas-Serrano D., Gomez-Diaz J. S. Nonreciprocal and collimated surface plasmons in drift-biased graphene metasurfaces // *Physical Review B*. — 2019. — aug. — Vol. 100, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.100.081410>.
17. Metasurface-mediated anisotropic radiative heat transfer between nanoparticles / Yong Zhang [et al.] // *Physical Review B*. — 2019. — aug. — Vol. 100, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.100.085426>.

18. Dual-polarized all-angle cloaking of a dielectric nanowire by helical graphene ribbons / Vitalii I. Shcherbinin [et al.] // *Physical Review B*. — 2019. — jul. — Vol. 100, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.100.035428>.
19. Ren Qun, You J. W., Panoiu N. C. Large enhancement of the effective second-order nonlinearity in graphene metasurfaces // *Physical Review B*. — 2019. — may. — Vol. 99, no. 20. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.99.205404>.
20. Magnetoplasmonic enhancement of Faraday rotation in patterned graphene metasurfaces / Michele Tamagnone [et al.] // *Physical Review B*. — 2018. — jun. — Vol. 97, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.97.241410>.
21. Direct  $S$ -matrix calculation for diffractive structures and metasurfaces / Alexey A. Shcherbakov [et al.] // *Physical Review E*. — 2018. — jun. — Vol. 97, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.97.063301>.
22. Tunable graphene metasurface reflectarray for cloaking, illusion, and focusing / Sudipta Romen Biswas [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2018. — mar. — Vol. 9, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.9.034021>.
23. Salary Mohammad Mahdi, Jafar-Zanjani Samad, Mosallaei Hossein. Time-varying metamaterials based on graphene-wrapped microwires: Modeling and potential applications // *Physical Review B*. — 2018. — mar. — Vol. 97, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.97.115421>.
24. Kotov O. V., Lozovik Yu. E. Enhanced optical activity in hyperbolic metasurfaces // *Physical Review B*. — 2017. — dec. — Vol. 96, no. 23. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.96.235403>.
25. Correas-Serrano Diego, Alù Andrea, Gomez-Diaz J. Sebastian. Plasmon canalization and tunneling over anisotropic metasurfaces // *Physical Review B*. — 2017. — aug. — Vol. 96, no. 7. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.96.075436>.
26. Hidden symmetries in plasmonic gratings / P. A. Huidobro [et al.] // *Physical Review B*. — 2017. — apr. — Vol. 95, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.95.155401>.
27. Wu Pin Chieh, Papasimakis Nikitas, Tsai Din Ping. Self-Affine graphene metasurfaces for tunable broadband absorption // *Physical Review Applied*. — 2016. — oct. — Vol. 6, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.6.044019>.
28. Metasurface perfect absorber based on guided resonance of a photonic hypercrystal / You-Chia Chang [et al.] // *Physical Review B*. — 2016. — oct. — Vol. 94, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.94.155430>.
29. Widely Tunable Terahertz Phase Modulation with Gate-Controlled Graphene Metasurfaces / Ziqi Miao [et al.] // *Physical Review X*. — 2015. — nov. — Vol. 5, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevx.5.041027>.
30. Tunable nonlinear graphene metasurfaces / Daria A. Smirnova [et al.] // *Physical Review B*. — 2015. — oct. — Vol. 92, no. 16. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.92.161406>.

31. Trushkov Iurii, Iorsh Ivan. Two-dimensional hyperbolic medium for electrons and photons based on the array of tunnel-coupled graphene nanoribbons // *Physical Review B*. — 2015. — jul. — Vol. 92, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.92.045305>.
32. Gomez-Diaz J. Sebastian, Tymchenko Mykhailo, Alù Andrea. Hyperbolic plasmons and topological transitions over uniaxial metasurfaces // *Physical Review Letters*. — 2015. — jun. — Vol. 114, no. 23. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.114.233901>.
33. Fallahi Arya, Perruisseau-Carrier Julien. Design of tunable biperiodic graphene metasurfaces // *Physical Review B*. — 2012. — nov. — Vol. 86, no. 19. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.86.195408>.
34. Temporal quantum control with graphene / A Manjavacas [et al.] // *New Journal of Physics*. — 2012. — dec. — Vol. 14, no. 12. — P. 123020. — URL: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/14/12/123020>.
35. Vladimirova Yu V, Zadkov V N. Quantum optics of quantum emitters in the near field of a nanoparticle // *Physics-Uspekhi*. — 2022. — may. — Vol. 65, no. 3. — P. 245–269. — URL: <https://doi.org/10.3367/ufne.2021.02.038944>.
36. Martín-Cano Diego, Haakh Harald R, Agio Mario. The squeezing spectrum of a quantum emitter coupled to an optical nanostructure // *Journal of Optics*. — 2016. — jan. — Vol. 18, no. 2. — P. 024010. — URL: <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/2/024010>.

#### 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](mailto:kostya_altunin@mail.ru)

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

IstinaResearcherID  66185348

**Инна Алексеевна Шарнина** — студент факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: [inna\\_sharnina27@mail.ru](mailto:inna_sharnina27@mail.ru)

ORCID iD  0000-0002-9777-7996

Web of Science ResearcherID  ABI-2941-2020

[@auxrussian@auxenglish](mailto:@auxrussian@auxenglish)

Original article  
PACS 01.40.Di  
OCIS 160.3918  
MSC 68P05

## Development of a distance course on the optics of graphene metasurfaces

K. K. Altunin , I. A. Sharnina 

*Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia*

Submitted June 30, 2023  
Resubmitted August 30, 2023  
Published December 12, 2023

---

**Abstract.** The results of the development of a distance course on the optics of graphene metasurfaces in the learning management system MOODLE are presented. The results of an expert evaluation of a distance course on the optics of graphene metasurfaces are presented.

**Keywords:** nanotechnology, nanotechnology course, course, online course, course material, lecture, test, task

---

### References

1. Electron metasurfaces in graphene / Ruihuang Zhao [et al.] // *Physical Review B*. — 2023. — apr. — Vol. 107, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.155404>.
2. 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>.
3. Christopoulos Thomas, Kriezis Emmanouil E., Tsilipakos Odysseas. Multimode non-Hermitian framework for third harmonic generation in nonlinear photonic systems comprising two-dimensional materials // *Physical Review B*. — 2023. — jan. — Vol. 107, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.035413>.
4. 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>.
5. 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>.
6. Random Graphene Metasurfaces: Diffraction Theory and Giant Broadband Absorptivity / Andrey Novitsky [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2022. — apr. — Vol. 17, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.17.044041>.



7. Electrically and thermally tunable multifunctional terahertz metasurface array / Yue Wang [et al.] // *Physical Review A*. — 2022. — mar. — Vol. 105, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.105.033520>.
8. Anisotropic radiative heat transfer between nanoparticles mediated by a twisted bilayer graphene grating / Shui-Hua Yang [et al.] // *Physical Review B*. — 2021. — sep. — Vol. 104, no. 12. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.104.125417>.
9. Exceptional points in flat optics: a non-Hermitian line-wave scenario / Massimo Moccia [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2021. — jun. — Vol. 15, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.15.064067>.
10. Enhancement and active mediation of near-field radiative heat transfer through multiple nonreciprocal graphene surface plasmons / Cheng-Long Zhou [et al.] // *Physical Review B*. — 2020. — dec. — Vol. 102, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.102.245421>.
11. Controlling light absorption of graphene at critical coupling through magnetic dipole quasi-bound states in the continuum resonance / Xing Wang [et al.] // *Physical Review B*. — 2020. — oct. — Vol. 102, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.102.155432>.
12. Enhanced near-field radiative heat transport between graphene metasurfaces with symmetric nanopatterns / Yizhi Hu [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2020. — oct. — Vol. 14, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.14.044054>.
13. You Jian Wei, Panoiu Nicolae C. Tunable and dual-broadband giant enhancement of second-harmonic and third-harmonic generation in an optimized graphene-insulator-graphene metasurface // *Physical Review B*. — 2020. — sep. — Vol. 102, no. 12. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.102.121403>.
14. Chiral Plasmons with Twisted Atomic Bilayers / Xiao Lin [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2020. — aug. — Vol. 125, no. 7. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.125.077401>.
15. Amin M., Siddiqui O., Farhat M. Linear and circular dichroism in graphene-based reflectors for polarization control // *Physical Review Applied*. — 2020. — feb. — Vol. 13, no. 2. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.13.024046>.
16. Correas-Serrano D., Gomez-Diaz J. S. Nonreciprocal and collimated surface plasmons in drift-biased graphene metasurfaces // *Physical Review B*. — 2019. — aug. — Vol. 100, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.100.081410>.
17. Metasurface-mediated anisotropic radiative heat transfer between nanoparticles / Yong Zhang [et al.] // *Physical Review B*. — 2019. — aug. — Vol. 100, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.100.085426>.
18. Dual-polarized all-angle cloaking of a dielectric nanowire by helical graphene ribbons / Vitalii I. Shcherbinin [et al.] // *Physical Review B*. — 2019. — jul. — Vol. 100, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.100.035428>.
19. Ren Qun, You J. W., Panoiu N. C. Large enhancement of the effective second-order nonlinearity in graphene metasurfaces // *Physical Review B*. — 2019. — may. — Vol. 99, no. 20. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.99.205404>.

20. Magnetoplasmonic enhancement of Faraday rotation in patterned graphene metasurfaces / Michele Tamagnone [et al.] // *Physical Review B*. — 2018. — jun. — Vol. 97, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.97.241410>.
21. Direct  $S$ -matrix calculation for diffractive structures and metasurfaces / Alexey A. Shcherbakov [et al.] // *Physical Review E*. — 2018. — jun. — Vol. 97, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.97.063301>.
22. Tunable graphene metasurface reflectarray for cloaking, illusion, and focusing / Sudipta Romen Biswas [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2018. — mar. — Vol. 9, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.9.034021>.
23. Salary Mohammad Mahdi, Jafar-Zanjani Samad, Mosallaei Hossein. Time-varying metamaterials based on graphene-wrapped microwires: Modeling and potential applications // *Physical Review B*. — 2018. — mar. — Vol. 97, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.97.115421>.
24. Kotov O. V., Lozovik Yu. E. Enhanced optical activity in hyperbolic metasurfaces // *Physical Review B*. — 2017. — dec. — Vol. 96, no. 23. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.96.235403>.
25. Correias-Serrano Diego, Alù Andrea, Gomez-Diaz J. Sebastian. Plasmon canalization and tunneling over anisotropic metasurfaces // *Physical Review B*. — 2017. — aug. — Vol. 96, no. 7. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.96.075436>.
26. Hidden symmetries in plasmonic gratings / P. A. Huidobro [et al.] // *Physical Review B*. — 2017. — apr. — Vol. 95, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.95.155401>.
27. Wu Pin Chieh, Papanikitas Nikitas, Tsai Din Ping. Self-Affine graphene metasurfaces for tunable broadband absorption // *Physical Review Applied*. — 2016. — oct. — Vol. 6, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.6.044019>.
28. Metasurface perfect absorber based on guided resonance of a photonic hypercrystal / You-Chia Chang [et al.] // *Physical Review B*. — 2016. — oct. — Vol. 94, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.94.155430>.
29. Widely Tunable Terahertz Phase Modulation with Gate-Controlled Graphene Metasurfaces / Ziqi Miao [et al.] // *Physical Review X*. — 2015. — nov. — Vol. 5, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevx.5.041027>.
30. Tunable nonlinear graphene metasurfaces / Daria A. Smirnova [et al.] // *Physical Review B*. — 2015. — oct. — Vol. 92, no. 16. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.92.161406>.
31. Trushkov Iurii, Iorsh Ivan. Two-dimensional hyperbolic medium for electrons and photons based on the array of tunnel-coupled graphene nanoribbons // *Physical Review B*. — 2015. — jul. — Vol. 92, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.92.045305>.
32. Gomez-Diaz J. Sebastian, Tymchenko Mykhailo, Alù Andrea. Hyperbolic plasmons and topological transitions over uniaxial metasurfaces // *Physical Review Letters*. — 2015. — jun. — Vol. 114, no. 23. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.114.233901>.

33. Fallahi Arya, Perruisseau-Carrier Julien. Design of tunable biperiodic graphene metasurfaces // *Physical Review B*. — 2012. — nov. — Vol. 86, no. 19. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.86.195408>.
34. Temporal quantum control with graphene / A Manjavacas [et al.] // *New Journal of Physics*. — 2012. — dec. — Vol. 14, no. 12. — P. 123020. — URL: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/14/12/123020>.
35. Vladimirova Yu V, Zadkov V N. Quantum optics of quantum emitters in the near field of a nanoparticle // *Physics-Uspekhi*. — 2022. — may. — Vol. 65, no. 3. — P. 245–269. — URL: <https://doi.org/10.3367/ufne.2021.02.038944>.
36. Martín-Cano Diego, Haakh Harald R, Agio Mario. The squeezing spectrum of a quantum emitter coupled to an optical nanostructure // *Journal of Optics*. — 2016. — jan. — Vol. 18, no. 2. — P. 024010. — URL: <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/2/024010>.

**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](mailto:kostya.altunin@mail.ru)

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

IstinaResearcherID  66185348

**Inna Alekseevna Sharnina** — 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: [inna\\_sharnina27@mail.ru](mailto:inna_sharnina27@mail.ru)

ORCID iD  0000-0002-9777-7996

Web of Science ResearcherID  ABI-2941-2020