

Научная статья
УДК 539.186
ББК 22.343
ГРНТИ 29.19.22
ВАК 01.04.05
PACS 42.25.Bs
OCIS 220.2945
MSC 78-11

Разработка дистанционного курса по наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE

К. К. Алтунин , Э. В. Орлова  ¹

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

Поступила в редакцию 11 сентября 2022 года

После переработки 12 сентября 2022 года

Опубликована 12 декабря 2022 года

Аннотация. Описан результат разработки модульной структуры, теоретических материалов, элементов контроля дистанционного курса по наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета. Курс по наноплазмонике предназначен для студентов бакалавриата педагогических направлений подготовки с физико-математическим профилем. Теоретические материалы по физическим свойствам наносистем с плазмонами, в которых могут распространяться плазмон-поляритоны, пополняют учебную дисциплину по наноплазмонике новыми научными сведениями. Для наполнения материалами курса по наноплазмонике выполнен анализ теоретических материалов по наноплазмонике, внедрены новые решения компоновки теоретических материалов в виде лекций и презентаций по наноплазмонике. Использование дистанционного курса по наноплазмонике позволяет хранить материалы курса в систематизированном виде, а также организовать проверку заданий по курсу наноплазмоники. В курсе наноплазмоники предусмотрен промежуточный контроль в виде прохождения лекций и занятий по подгруппам, написание рефератов, а также итоговый контроль в виде зачёта. Инновационным компонентом дистанционного курса по наноплазмонике, созданного в системе управления обучением MOODLE, является расширение области дополнительной предметной подготовки обучающихся по наноплазмонике.

Ключевые слова: наноплазмоника, плазмон, плазмон-поляритон, наносистема с плазмонами, курс, дистанционный курс, предметная подготовка, система управления обучением MOODLE, организация проверки заданий, лекция, задание

¹E-mail: lvrerlova@gmail.com

Введение

В настоящее время дистанционные технологии и смешанные технологии обучения в области физико-технических наук широко используются в образовательном процессе в университетах. В связи с этим тема работы по созданию дистанционного курса по наноплазмонике представляется актуальной.

В работе рассматривается технология создания курса по наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE.

Целью работы является создание курса по наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE.

Задачи исследования состоят в том, чтобы создать теоретические материалы курса по наноплазмонике в системе управления обучения MOODLE, систематизировать теоретические материалы по наноплазмонике для использования в теоретической части разрабатываемого курса по наноплазмонике, разработать модульную структуру и элементы курса по наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE.

Объектом исследования является курс по наноплазмонике.

Предметом исследования является процесс разработки дистанционного курса по наноплазмонике в системе управления обучения MOODLE.

Гипотеза исследования состоит в том, что если создать и использовать дистанционный курс «Наноплазмоника», основанный на комбинации теоретических методов и численных методов в процессе изучения наноплазмоники, то можно повысить познавательный интерес к курсу по наноплазмонике и реализовать систему смешанного обучения наноплазмонике.

В качестве методов исследования используется анализ теоретических материалов по наноплазмонике, синтез различных концепций описания физических процессов в наноплазмонных системах, проектирование курса по наноплазмонике. В качестве материалов исследования используются теоретические материалы по наноплазмонике.

Научная новизна работы заключается в использовании дистанционных образовательных технологий в процессе изучения понятий, законов и процессов наноплазмоники. Дистанционный курс по наноплазмонике будет содержать новые сведения из наноплазмоники, а также описание оригинальных результатов по описанию квантовомеханических и оптических свойств наноплазмонных структур, находящихся в поле оптического излучения.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что созданный курс по наноплазмонике может быть использован в создании новой методологии обучения наноплазмоники в бакалавриате по педагогическому направлению подготовки физико-математического профиля в педагогическом университете, пополнении научной базы актуальными теоретическими материалами и задачами по наноплазмонике.

Практическая значимость исследования заключается в выявлении характерных особенностей процесса разработки дистанционного курса по наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE.

Базой исследования дистанционного курса по наноплазмонике, созданного в системе управления обучением MOODLE, является образовательный портал ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И. Н. Ульянова».

Обзор работ по наноплазмонике

Информация о том, как теоретически исследовано усиление терагерцевых плазмонов в графене с диффузионной накачкой графена оптическими плазмонами, распространяющимися в металле, отделённом от графена слоем полупроводника, рассмотрена в статье [1].

В статье [1] показано, что диффузионная накачка графена оптическими плазмонами позволяет увеличить значение коэффициента усиления терагерцевых плазмонов в графене приблизительно на 60 % по сравнению с диффузионной накачкой графена оптическим излучением при одинаковом уровне накачки графена.

В статье [2] исследованы дисперсионные уравнения, замедление, групповая скорость, условия для прямых и обратных, медленных и быстрых плазмонов вдоль тонких металлических плёнок, а также графеновых листов, в том числе расположенных на диэлектрическом слое и в диэлектрике. Рассмотрены недиссипативные и диссипативные поверхностные плазмоны. Обратный недиссипативный симметричный плазмон не наблюдается в диссипативной плёнке серебра. Показано, что из аномальной отрицательной дисперсии диссипативного плазмона не следует, что он обратный. Для обратного диссипативного плазмона входной импеданс структуры со стороны вакуума должен быть ёмкостным, а плазмон втекающим. Рассмотрены симметричные и несимметричные структуры с такими свойствами.

В статье [3] найдены распределение поля и спектр собственных плазменных колебаний на круглом отверстии в экране, который имеет форму гиперболоида вращения. Получен спектр плазмонов для плоского экрана с круглым отверстием. Симметричная мода с $m = 1$ может возбуждаться под действием поля диполя, ориентированного вдоль плоскости экрана, а антисимметричная мода с $m = 0$ — диполем, перпендикулярным плоскости экрана.

В работе [4] рассматривается одномерный фотонный кристалл и падающая на него световая волна, направление которой неколлинеарно градиенту диэлектрической проницаемости кристалла. На основе уравнений «связанных мод» получены собственные решения для полей; среди решений особый акцент делается на эванесцентные волны. Анализируется преобразование полей на границах кристалл–воздух и кристалл–металл. Получено условие резонансного возбуждения поверхностных волн на границе кристалла с металлом и дается оценка эффективности трансформации исходной распространяющейся волны в поверхностную.

В последние десятилетия интенсивно проводятся исследования различных типов плазмонных наноконструкций. Такие структуры обладают уникальными оптическими и оптоэлектронными свойствами благодаря наличию у них резонансных полос поглощения в видимом диапазоне, связанных с коллективными колебаниями электронной плотности в металлических наночастицах. Широкое распространение получает применение плазмонных наноконструкций в оптике и электронике, при разработке высокочувствительных сенсоров. Плазмонные структуры позволяют локализовать оптический сигнал на малых пространственных масштабах, обходя дифракционные запреты. Они также могут оказаться весьма полезными при разработке быстродействующих оптоэлектронных элементов. Металлические наночастицы в плазмонных наноконструкциях, как правило, распределены в объёме матрицы хаотически, случайным образом. Вместе с тем, при формировании наноконструкций с частично упорядоченной структурой появляются дополнительные возможности управления их оптическими свойствами.

По определению, поверхностные плазмон-поляритоны — это колебания электронов проводимости в металле, связанные с распространяющимся электромагнитным полем. Они существуют на границах раздела между диэлектриком и проводником. Амплитуда поверхностных плазмон-поляритонов экспоненциально спадает с увеличением расстояния, перпендикулярного границе раздела. Следовательно, поверхностные плазмонные поляритоны представляют собой поверхностные электромагнитные волны, имеющие электромагнитное поле, ограниченное в непосредственной близости от границы раздела металл-диэлектрик. Это приводит к сильному усилению поля на границе раздела, что делает поверхностные плазмон-поляритоны чрезвычайно чувствительными к каче-

ству поверхности.

Быстро развивающейся ветвью фотоники является плазмоника, которая открывает возможности для сочленения устройств электроники и фотоники в интегральных микросхемах, повышения предела чувствительности биосенсоров, химических и других сенсоров. Ключевым объектом изучения плазмоники являются плазмон-поляритоны — связанные колебания электромагнитного поля световой волны и электронов проводимости металла или полупроводника. Для возбуждения плазмон-поляритонов оптическим излучением необходимо выполнение условий фазового синхронизма, которые достигаются, в частности, в наноструктурированных средах. При возбуждении плазмон-поляритонов происходит локализация электромагнитной энергии на пространственных масштабах, меньших длины волны излучения, что повышает эффективность взаимодействия фотонов и электронов. Эта особенность плазмонных структур может использоваться для сочленения традиционных устройств электроники и оптических элементов передачи и обработки информации.

В последние годы большое внимание уделяется плазмонике, в частности нелинейной плазмонике. Это связано с тем, что она может поддерживать появление значительных и новых явлений, включая отрицательное преломление, маскировку и сверхчувствительность, обеспечивая различные приложения в плазмонных устройствах, таких как плазмонные датчики [5, 6], оптоэлектроника [7] и маскировка метаматериалами [8]. Таким образом, плазмонное поле имеет дело с генерацией, манипулированием и детектированием поверхностных плазмон-поляритонов. Поверхностные плазмон-поляритоны — это квазичастицы, возникающие в результате взаимодействия света и поверхностных плазмонов [9]. В свою очередь, поверхностные плазмоны — это электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль граничной поверхности между металлом (или полупроводником) и диэлектриком [9].

Полностью оптические сети являются решением повышенных требований к полосе пропускания для передачи данных, позволяя архитектурам современных оптоэлектронных приборов становиться всё более интегрированными [10]. Для высокой плотности интеграции требуются компоненты небольшого размера, которые обеспечивают высокое ограничение сигнала, особенно в областях изгиба. Длины волн света позволяют создавать оптические волноводы в поперечном сечении в диапазоне микрометров [11]. Возможный способ расширить оптоэлектронику до нанометрового режима — это преобразовать фотон в плазмоны, существующие на частотах выше, чем у света [12]. Плазмоны представляют собой волны плотности в электронном газе аналогично звуковым волнам и существуют в основном в металлах со слабосвязанными электронами [13].

Плазмонные материалы (в основном металлы) имеют значительные потери в интересующем диапазоне частот [14]. Чтобы преодолеть это ограничение плазмонной геометрии на основе металлов, физики были заинтересованы в исследовании плазмонов и их потерь в новых материалах с выдающимися свойствами [15]. Например, графеновые плазмоны могут преодолеть трудности, возникающие из-за s -поляризованных поперечных электрических мод. Из-за отсутствия сильного ограничения поля в системах с параболической зонной структурой поперечные электрические моды не являются обычными для плазмонных структур на основе металлов [16, 17]. В качестве бесщелевого материала графен может быть легирован до высоких значений концентрации электронов и дырок, приложив внешнее напряжение [18]. Кроме того, коллективное возбуждение плазмонов в графене имеет большое значение и потенциал для технологических приложений [19]. Другой уникальной особенностью графена является его способность настраивать оптическую проводимость с помощью электрических и магнитных полей, потенциала затвора [20, 21] и химического легирования [22].

Рассмотрим использование наноматериалов в наноплазмонике. Наноматериалы всё чаще развиваются и используются во множестве приложений. Наноматериалы демонстрируют широкий спектр основных физических свойств, которые можно широко адаптировать для разработки новых приборов наноразмерной оптоэлектроники и адаптированных функций оптоэлектроники. В частности, наноструктурированные оптические среды считаются серьезными претендентами на разработку следующего поколения ультраинтегрированных оптических и оптоэлектронных приложений, таких как управление светом в технологиях передачи данных.

Класс металл-диэлектрических наноструктур, которые считаются особенно подходящими для этих нанофотонных приложений, обладают оптическими свойствами, основанными на резонансных возбуждениях плотности свободных электронов в металле [5, 12, 23–25]. Эти электромагнитные моды, известные как поверхностные плазмоны, обладают уникальными свойствами электромагнитного поля. Они демонстрируют сильное ограничение и усиление пространственного поля и оказываются чрезвычайно чувствительными к геометрии несущей конструкции, что позволяет производить обширную настройку как их спектральных свойств, так и связанного с ними распределения электромагнитного поля с помощью соответствующей конструкции [26–29]. Это позволяет запускать нелинейные оптические эффекты при очень низких мощностях возбуждения и обеспечивает чувствительность отдельных молекул в оптической спектроскопии [30–32]. Плазмонные наноструктуры, часто называемые в этом контексте метаматериалами, уже используются для инженерии с отрицательным показателем преломления, суперлинзирования, оптической маскировки и медленного света [33–37]. Уникальные электромагнитные свойства плазмонных мод также представляют возможность разработки динамических функций на основе металл-диэлектрических материалов, позволяющих осуществлять активное управление оптическими сигналами с электрическими, магнитными или оптическими стимулами [30, 37, 38].

В работе [38] представлен обзор оптических свойств нелинейных поверхностных плазмон-поляритонных кристаллов и их приложений для управления светом с помощью света. Поверхностные плазмон-поляритонные кристаллы представляют собой периодически наноструктурированные металлические поверхности или тонкие металлические пленки, которые действуют как двумерные фотонные кристаллы для поверхностных поляритонов. Гибридизация таких наноструктур диэлектриками, демонстрирующими оптический нелинейный отклик, позволяет использовать эффекты усиления электромагнитного поля для наблюдения нелинейных эффектов и бистабильного поведения при низкой интенсивности света. Изменяя геометрию наноструктурированной плёнки, модифицируется дисперсия кристалла, и, таким образом, структура электромагнитных мод и связанная с ними плотность состояний могут быть управляемым образом настроены в желаемом спектральном диапазоне. Это обеспечивает повышенную гибкость в разработке нелинейно-оптического отклика плазмонных кристаллов в выбранном спектральном диапазоне для длин волн как управления, так и сигнала.

Гибкость в дизайне плазмонных мод проявляется в единственной наночастице – металлической частице или диэлектрической пустоте в объёме металла. Простые геометрические модификации формы, размера и окружающей среды частицы могут существенно изменить гашение поддерживаемых плазмонных мод с возможностью генерации многополярных резонансов, связанных с характерным пространственным распределением поля, и настройки резонансных длин волн от ультрафиолетового до видимого диапазонов, в инфракрасную часть спектра [39, 40]. Дополнительный уровень сложности в дизайне экстинкции одиночных частиц связан с возможностью создания гибридных плазмонных мод [41–46]. Эти моды возникают из-за сильной электромагнитной связи между взаимодействующими наночастицами. В такой геометрии спектральное

и пространственное перекрытие между плазмонными модами, поддерживаемыми двумя или более наночастицами, будет когерентно интерферировать, создавая новые смешанные моды, представляющие новые собственные моды связанной системы. Система наночастиц, вносящих вклад в гибридную структуру, больше не может быть описана как простая сумма резонансов отдельных наночастиц, а должна рассматриваться как новая единичная сущность. Фактически, в ситуациях сильной связи оптические свойства, связанные с гибридной системой, уникальны по сравнению с характеристиками составляющих, предоставляя мощные средства для обширной адаптации оптических свойств плазмонных систем с целью разработки новых и улучшенных оптических функций [41]. На основе этого принципа были созданы геометрии, включающие смещение гладких поверхностных плазмонов [47], локализованных мод [48–52], локализованных и делокализованных плазмонных мод [53, 54] и даже гетерогенных состояний, возникающих из смешанных плазмонных и экситонных мод с влиянием на спектральные, пространственные и динамические свойства смешанных собственных мод [55–60].

В работе [42] изучается возбуждение поверхностных плазмонов в парах одинаковых наночастиц золота методом оптической спектроскопии пропускания. Образцы, полученные методом электронно-лучевой литографии, состоят из двухмерных наборов частиц с различным расстоянием между частицами. С уменьшением межчастичного расстояния поверхностный плазмонный резонанс смещается в сторону более длинных волн для направления поляризации, параллельного длинной оси пары частиц, тогда как синее смещение обнаруживается для ортогональной поляризации. Эти экспериментальные данные можно объяснить дипольным механизмом взаимодействия.

Рассмотрим методы возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов. К настоящему времени были разработаны два эффективных метода возбуждения поверхностных электромагнитных волн светом: решёточный и призмный. Дифракционные решётки обладают свойством возбуждать поверхностные плазмон-поляритоны. Они нанесены на поверхность среды и рассеивают излучение под определенным углом. Дифракционные решётки должны быть вырезаны в металлической поверхности и в то же время могут состоять из диэлектрического материала.

Возбуждение поверхностных поляритонов светом методом Отто через призму нарушенного полного внутреннего отражения над кристаллом [61, 62] приводит к поглощению света “нерадиационными” поверхностными поляритонами и, в соответствии с законом Кирхгофа, система, поглотившая свет, может излучить его, то есть стать радиационной [63].

В работе [61] описан метод возбуждения безызлучательных поверхностных плазмонных волн на гладких поверхностях, вызывающий также новое явление при полном отражении. Поскольку фазовая скорость поверхностных плазмонных волн на поверхности металл-вакуум меньше, чем скорость света в вакууме, эти волны не могут быть возбуждены светом, падающим на поверхность, при условии, что она идеально гладкая. Однако, если призму приблизить к границе раздела металлического вакуума, поверхностные плазмонные волны могут быть оптически возбуждены затухающей волной, присутствующей при полном отражении. Возбуждение проявляется в сильном уменьшении отражения поперечного магнитного света и при определенном угле падения. Метод позволяет точно оценить дисперсию этих волн.

Анализ литературы по наноплазмонике показывает актуальность темы исследования.

Разработка структуры и элементов дистанционного курса по наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE

В работе рассматривается технология создания дистанционного курса по наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE. Применение формата MOODLE на проблемно-ориентированной основе обеспечивает прозрачность результатов, включая тестирование в формате активного, операционального, рефлексивного обучения.

Под проектированием дистанционного курса по наноплазмонике понимают процесс разработки дистанционного курса, в котором активно используются автоматизированные методы контроля в ходе продвижения при изучении курса по наноплазмонике. Основные задачи изучения курса по наноплазмонике состоят в развитии логики теоретического мышления, интуиции, творческих способностей, овладении системой знаний и умений по наноплазмонике. Основным подход к изучению курса по наноплазмонике с использованием информационных технологий заключается в увеличении визуально воспринимаемой студентом информации посредством использования дистанционного курса в процессе изучения наноплазмоники в университете. Структура дистанционного курса по наноплазмонике включает в себя специальным образом сформированные модули, содержащие тематические связанные материалы и элементы контроля в виде тестов, задач и заданий. На первом этапе создания дистанционного курса производится определение целей и задач, которые необходимо реализовать в процессе проектирования дистанционного курса. На втором этапе создания дистанционного курса производится разработка структуры дистанционного курса в строгом соответствии с выбранной тематикой и объёмом курса по наноплазмонике. На третьем этапе создания дистанционного курса по наноплазмонике производится разработка содержания блоков дистанционного курса по тематическим модулям и темам. На четвёртом этапе создания дистанционного курса производится визуализация полученной структуры в наглядном виде для планомерного контроля наполнения различных модулей и тем курса по наноплазмонике. На пятом этапе создания дистанционного курса производится поиск программного обеспечения для разработки дистанционного курса по наноплазмонике и его создание. Дизайн дистанционного курса выполнен средствами системы управления обучением MOODLE. На шестом этапе создания дистанционного курса производится разработка методических рекомендаций для пользователя ресурса. На седьмом этапе создания дистанционного курса по наноплазмонике производится наполнение модулей элементами и отладка элементов. На восьмом этапе создания дистанционного курса производится разработка банка тестовых вопросов и заданий по курсу по наноплазмонике, создание банка тестов, компоновка тестов по темам и модулям. На девятом этапе создания дистанционного курса производится апробация дистанционного курса по наноплазмонике в учебном процессе. На десятом этапе создания дистанционного курса производится корректирование содержания и выявление недостатков дистанционного курса.

Использование дистанционных курсов решает проблему систематизации теоретического материала, задач и заданий, а также обеспечивает планомерную выдачу заданий, последовательный контроль и даёт рациональный подход в преподавании наноплазмоники. Применение дистанционного курса по наноплазмонике обеспечивает обучение студентов университета в удобном темпе и выбранном уровне материала. Дистанционный курс по наноплазмонике позволяет успешно решить задачу построения индивидуальных образовательных траекторий для студентов.

Курс по наноплазмонике представляет собой структурированную совокупность гипертекстовых страниц, в которых заключен необходимый теоретический материал по физическим основам наноплазмоники, справочные таблицы, рисунки, справочные материалы по наноплазмонике, тесты и элементы навигации средствами системы управ-

ления обучение MOODLE. Закрывая и открывая модули можно поддерживать темп продвижения по курсу по наноплазмонике средствами системы управления обучением MOODLE. Для более глубокого изучения тем можно воспользоваться источниками, приведёнными в списке рекомендуемой литературы, и гиперссылками на внутренние и внешние источники информации в глобальной сети Интернет. По основным терминам и определениям дистанционный курс по наноплазмонике содержит гиперссылки на статьи глоссария. Весь теоретический материал по наноплазмонике можно разделены на темы, а каждая из тем, в свою очередь, делится на модули. В свою очередь модули могут подразделяться на подтемы. В дистанционном курсе по наноплазмонике приведены примеры решения задач, задачи с ответами для самостоятельного решения и задачи без ответов для проведения проверочных и контрольных работ. Каждая изучаемая тема в дистанционном курсе по наноплазмонике включает элементы, содержащие следующие учебные элементы: необходимый теоретический материал, дидактические материалы к занятиям, ряд заданий для самостоятельной работы, гиперссылки на рекомендуемые учебные издания и учебники по наноплазмонике, гиперссылки на внешние электронные источники информации. Преподаватель может своевременно отслеживать продвижение студентов курса.

Рассмотрим результаты разработки элементов темы по распространению объёмных плазмонов.

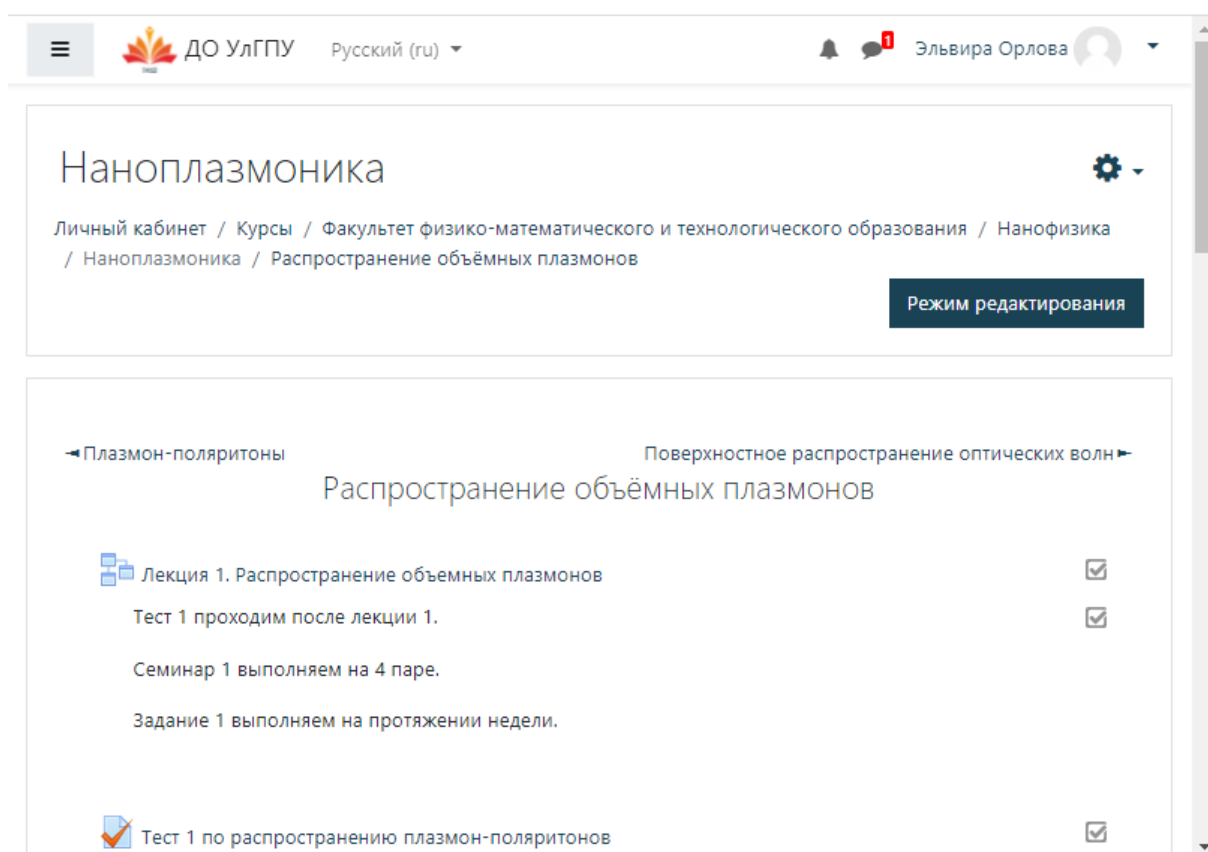


Рис. 1. Страница с теоретическими и контролирующими элементами в избранной теме курса «Наноплазмоника».

На рис. 1 изображена страница с теоретическими и контролирующими элементами в избранной теме курса «Наноплазмоника».

На рис. 2 изображена страница с элементами темы курса по наноплазмонике, включающая элементы в виде лекции, теста, вики-элемента, семинара, заданий.

В лекцию можно добавить материал по изучению темы, удобство заключается в том,

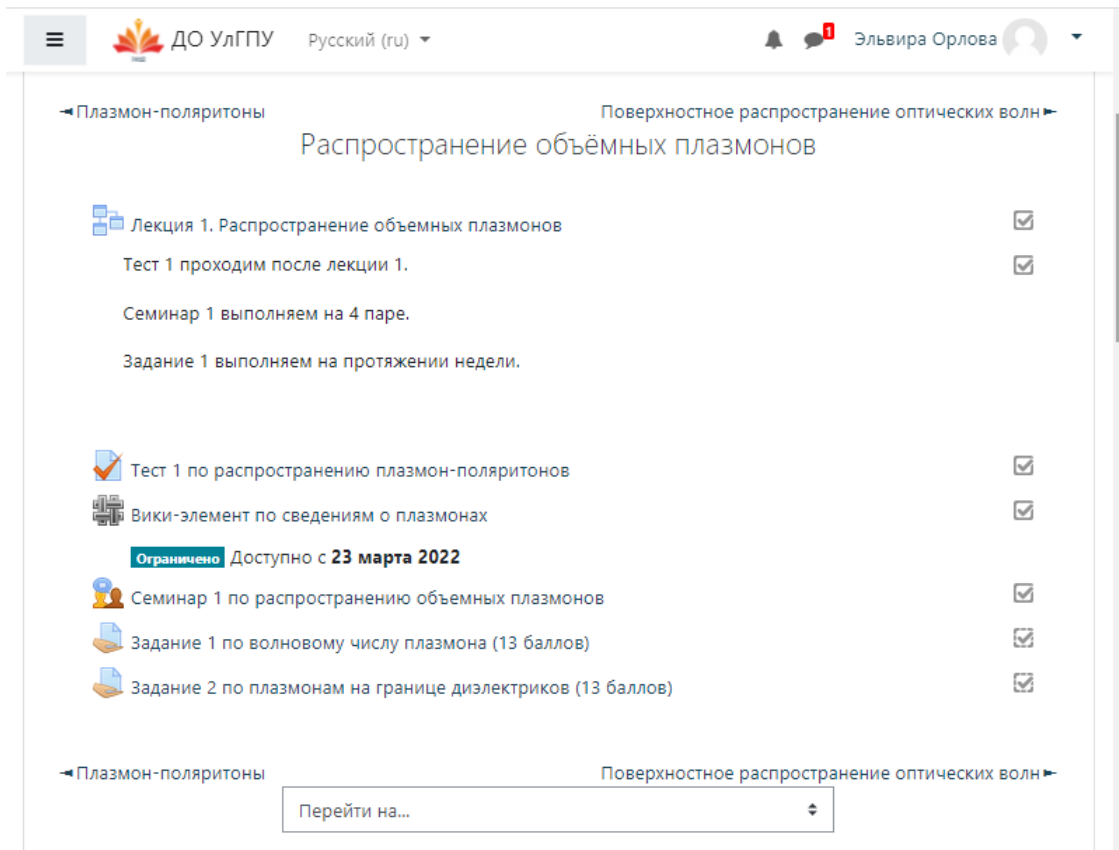


Рис. 2. Страница с элементами темы курса по наноплазмонике, включающая элементы в виде лекции, теста, вики-элемента, семинара, заданий.

что на странице лекции, можно добавить формулы, можем вставить какие-либо картинки, написать пояснения. Также лекция автоматически делится на разные страницы с вопросом к лекции.

На рис. 3 изображена страница с первой частью лекции по курсу «Наноплазмоника».

На рис. 4 изображена страница со второй частью лекции по курсу «Наноплазмоника».

Распространение поверхностного плазмон-поляритона описывается волной с константой распространения поверхностного плазмон-поляритона в следующем виде:

$$\beta(\omega) = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_1(\omega) \varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1(\omega) + \varepsilon_2(\omega)}}, \quad (1)$$

где $\beta(\omega) = \beta'(\omega) + i\beta''(\omega)$, $k_0 = \omega/c$ – волновое число волны в вакууме.

$$\beta_{01}(\omega) = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_0(\omega) \varepsilon_1(\omega)}{\varepsilon_0(\omega) + \varepsilon_1(\omega)}}, \quad (2)$$

$$\beta_{12}(\omega) = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_1(\omega) \varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1(\omega) + \varepsilon_2(\omega)}}. \quad (3)$$

Условия распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела среды “0” и среды “1”:

$$\begin{cases} \varepsilon_0(\omega) \varepsilon_1(\omega) < 0, \\ \varepsilon_0(\omega) + \varepsilon_1(\omega) < 0. \end{cases} \quad (4)$$

ДО УлГПУ Русский (ru) Эльвира Орлова

Лекция 1. Распространение объемных плазмонов

Просмотр Редактировать Отчеты Оценить эссе

Рассматривается граница раздела металла и диэлектрика, на которой распространяется плазмон-поляритон.

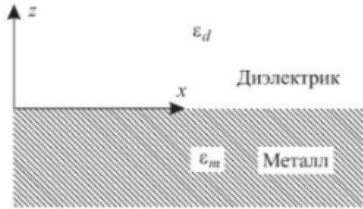


Рис. 1. Геометрия задачи о поверхностных плазмонах на границе металла и диэлектрика. Волны распространяются вдоль оси x декартовой системы координат.

Для распространения плазмон-поляритона на границе раздела металла и диэлектрика уравнение Максвелла имеет вид:

$$\mathbf{E}_m = E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \frac{k_{sp}}{k_{zm}} \end{pmatrix} \exp(i(k_{sp}x - k_{zm}z - \omega t))$$

$$\mathbf{H}_m = -E_0 \frac{\epsilon_m \omega}{k_{zm} c} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \exp(i(k_{sp}x - k_{zm}z - \omega t))$$

Рис. 3. Страница с первой частью лекции по курсу «Наноплазмоника».

ДО УлГПУ Русский (ru) Эльвира Орлова

Для распространения плазмон-поляритона на границе раздела металла и диэлектрика уравнение Максвелла имеет вид:

$$\mathbf{E}_m = E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \frac{k_{sp}}{k_{zm}} \end{pmatrix} \exp(i(k_{sp}x - k_{zm}z - \omega t))$$

$$\mathbf{H}_m = -E_0 \frac{\epsilon_m \omega}{k_{zm} c} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \exp(i(k_{sp}x - k_{zm}z - \omega t))$$

в области заполненной металлом, и

$$\mathbf{E}_d = E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \frac{k_{sp}}{k_{zd}} \end{pmatrix} \exp(i(k_{sp}x - k_{zd}z - \omega t))$$

$$\mathbf{H}_d = -E_0 \frac{\epsilon_d \omega}{k_{zd} c} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \exp(i(k_{sp}x - k_{zd}z - \omega t))$$

Поверхностные плазмон-поляритоны в системе металл и диэлектрик имеют только одну ТМ поляризацию.

не верно верно

Отправить

Рис. 4. Страница со второй частью лекции по курсу «Наноплазмоника».

Условия распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела среды “1” и среды “2”:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(\omega) \varepsilon_2(\omega) < 0, \\ \varepsilon_1(\omega) + \varepsilon_2(\omega) < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Разработка элементов контроля знаний в составе дистанционного курса по наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE

Рассмотрим результаты процесса разработки элементов контроля знаний в составе дистанционного курса по наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE.

Каждая изучаемая тема в дистанционном курсе по наноплазмонике включает элементы, содержащие следующие контролируемые элементы: тестовые задания для организации промежуточного и итогового контроля по наноплазмонике. Правильная подборка физических задач и заданий в каждом тематическом модуле курса по наноплазмонике поможет закрепить изученный материал и подготовить студента с помощью материалов и заданий курса по наноплазмонике.

На первом этапе создания банка заданий и вопросов производится определение целей и задач, для которых будет использоваться банка заданий и вопросов. Банк вопросов, предназначенный для стандартного тестового контроля, и банк вопросов, предназначенный для тестового контроля заданий разного уровня и тематического содержания, будут существенно различаться. На втором этапе создания банка заданий и вопросов производится разработка тематической структуры банка заданий и вопросов в соответствии с выбранными целями и задачами. На третьем этапе создания банка заданий и вопросов производится разработка содержания тестовых заданий и вопросов в составе банка вопросов и заданий. На четвертом этапе создания банка заданий и вопросов производится наполнение банка вопросов и заданий различными типами вопросов и заданий. На пятом этапе создания банка заданий и вопросов производится создание тестов в составе моделей и тем курса по наноплазмонике. На шестом этапе создания банка заданий и вопросов производится отладка тестов в составе дистанционного курса по наноплазмонике. На седьмом этапе создания банка заданий и вопросов производится разработка методических рекомендаций по использованию тестов в составе моделей и тем курса по наноплазмонике. На восьмом этапе создания банка заданий и вопросов производится апробация банка тестовых вопросов и заданий по наноплазмонике в учебном процессе. На девятом этапе создания банка заданий и вопросов производится корректирование содержания и выявление недостатков банка тестовых вопросов и заданий в составе дистанционного курса по наноплазмонике.

Рассмотрим процесс разработки системы контроля курса «Наноплазмоника».

На рис. 5 изображена страница теста 1 по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

Тест может содержать любое количество вопросов, которые связаны с темой лекции. В нашем случае тест состоит из двух вопросов. Большим плюсом данной системы является, автоматическая проверка теста осуществляется компьютером. Систему оценивая, можно настроить, так как нам нужно. Особенностью является то, что за неправильный ответ на вопрос теста, мы можем включить штрафные баллы, которые будут вычитаться из общего количества баллов за правильные ответы.

На рис. 6 изображена страница первого вопроса из теста 1 по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

На рис. 7 изображена страница второго вопроса из теста 1 по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

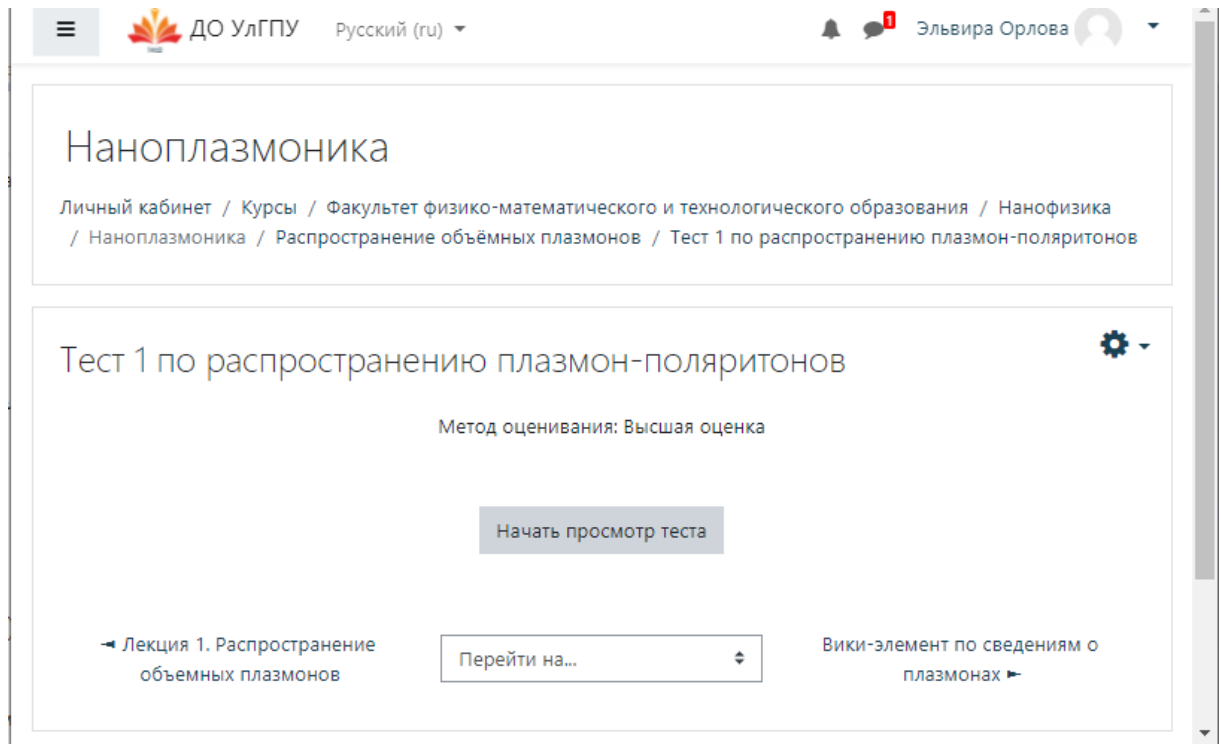


Рис. 5. Входная страница теста 1 по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

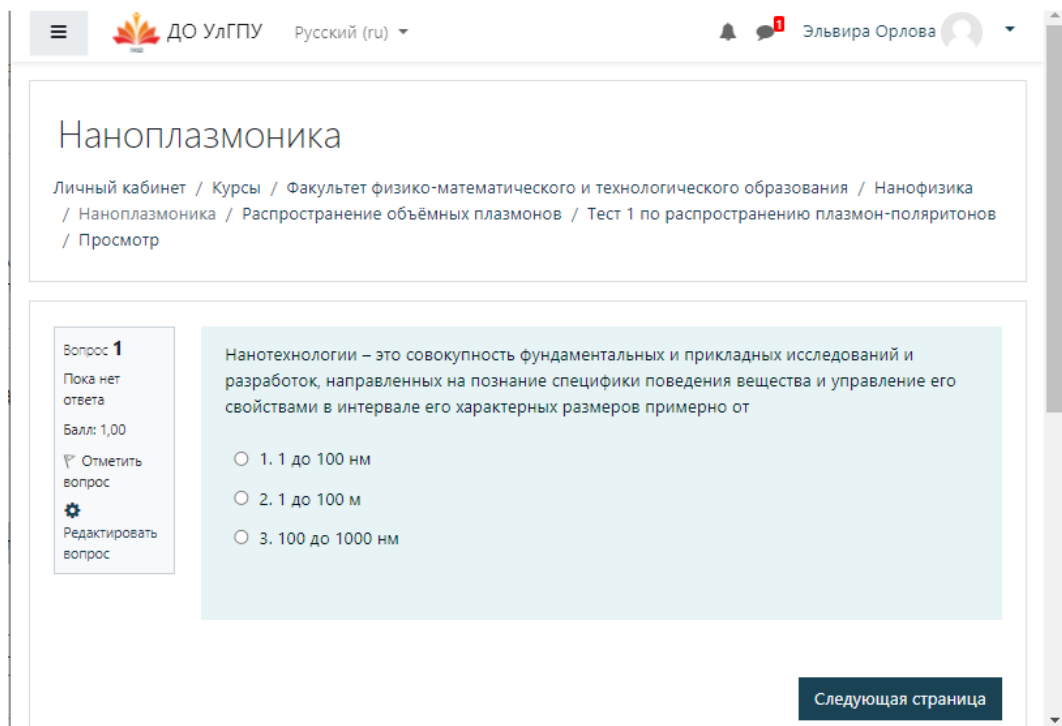


Рис. 6. Первый вопрос из теста 1 по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

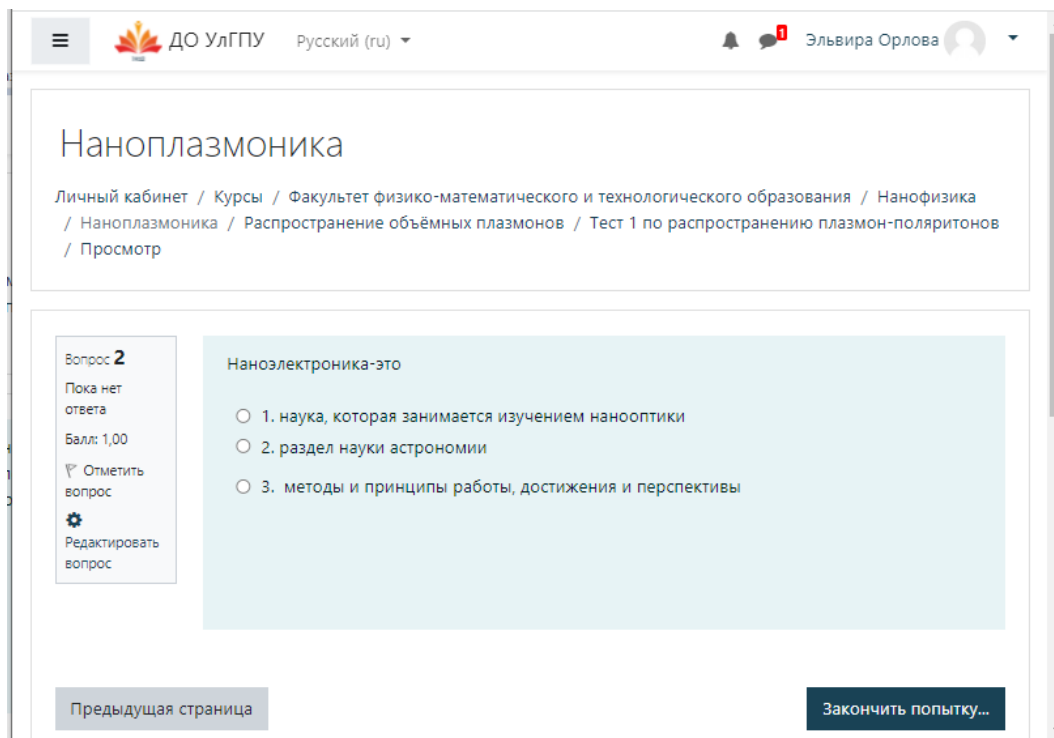


Рис. 7. Второй вопрос из теста 1 по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

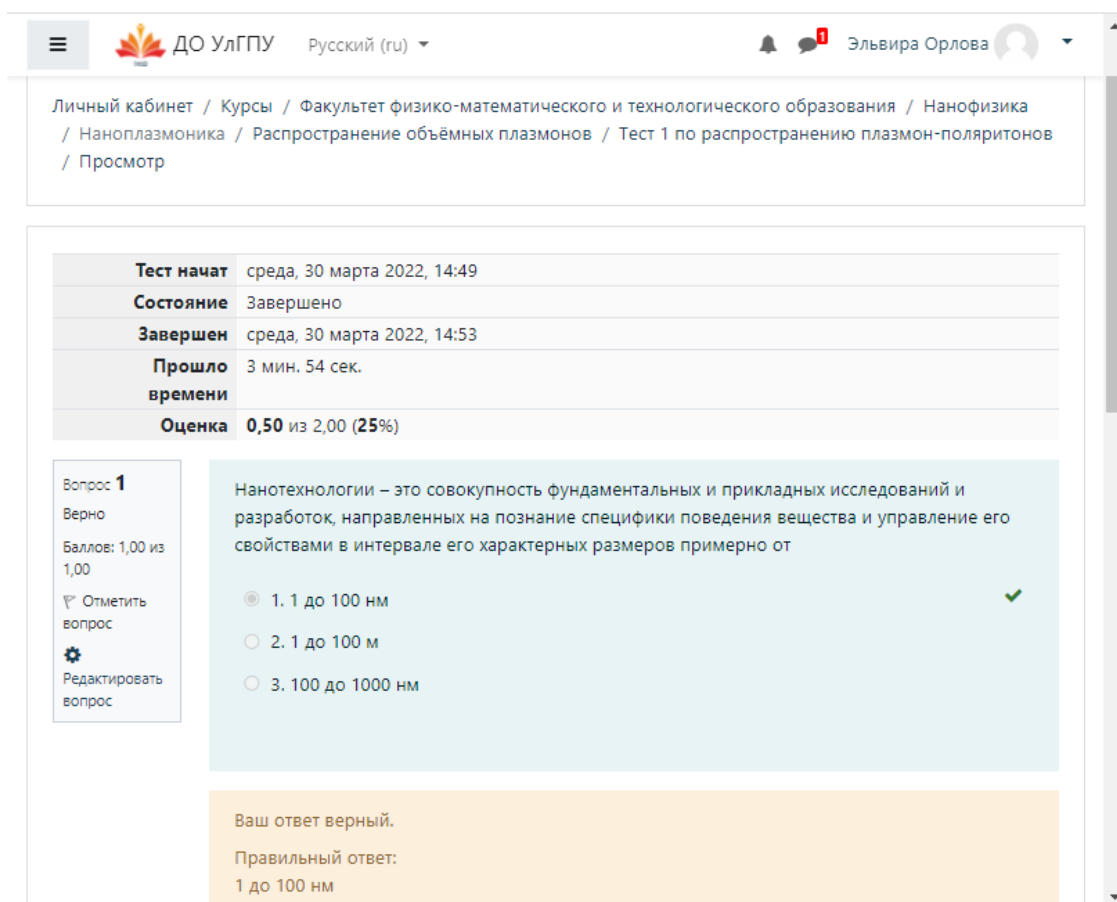


Рис. 8. Страница с результатами теста 1 по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

На рис. 8 изображена страница с результатами теста 1 по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

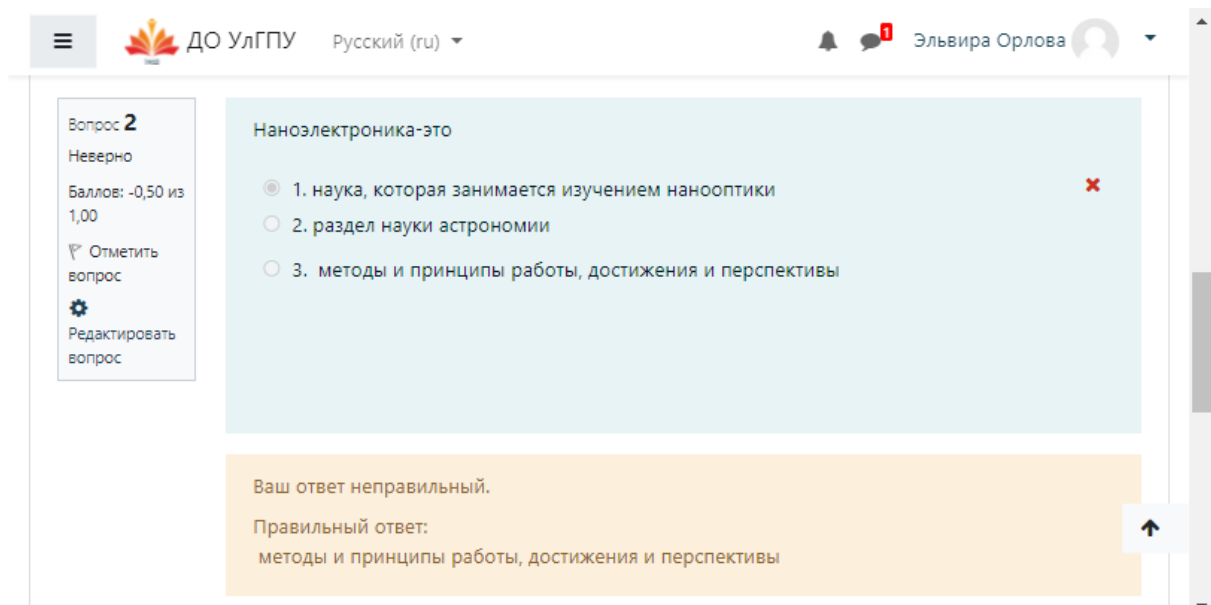


Рис. 9. Страница с результатами теста 1 по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

На рис. 9 изображена страница с результатами теста 1 по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

В заданиях предлагается не просто выбрать правильный вариант ответа, а поразмышлять над поставленными вопросами и написать самостоятельно, учитывая указания преподавателя.

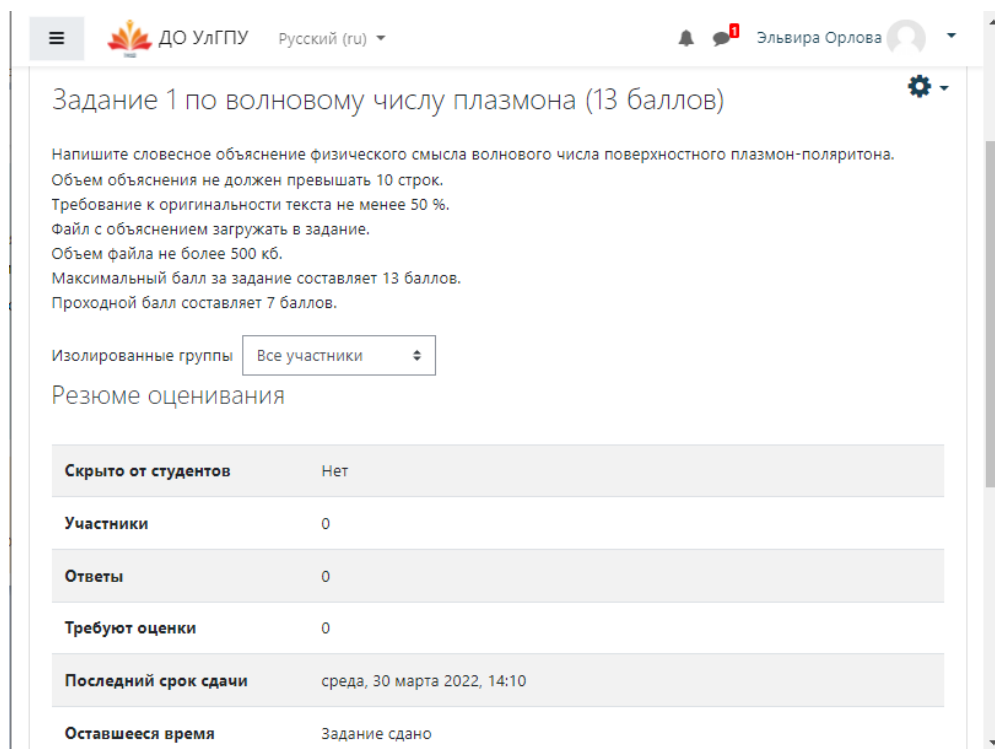


Рис. 10. Страница задания 1 по теме, связанной с распространением поверхностных плазмон-поляритонов.

На рис. 10 изображена страница задания 1 по теме, связанной с распространением поверхностных плазмон-поляритонов.

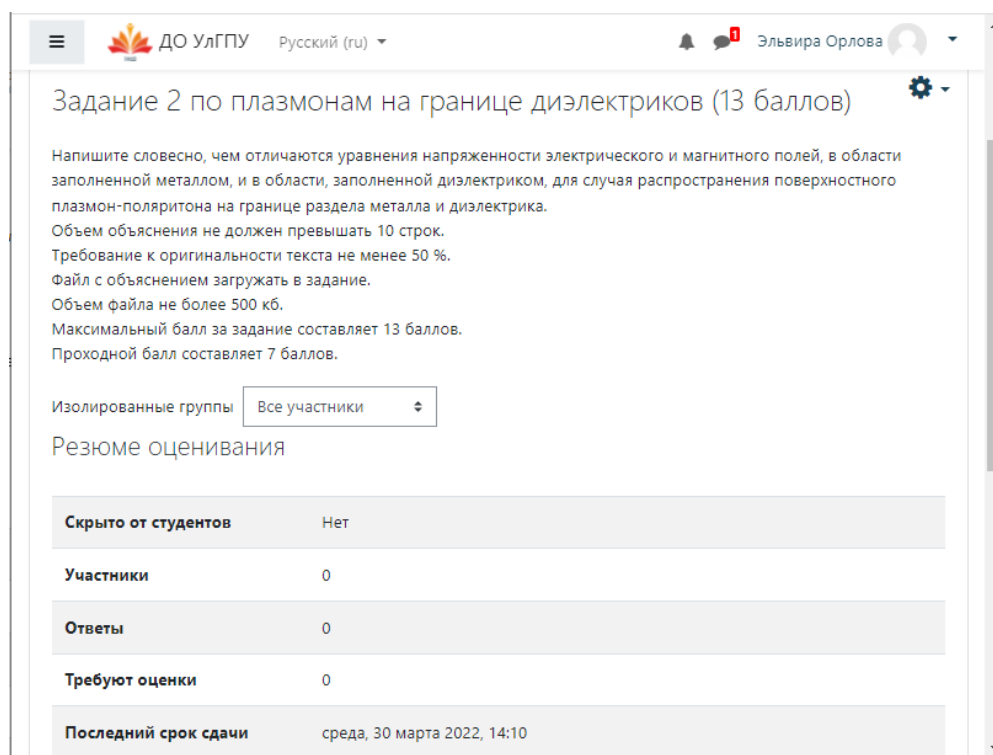


Рис. 11. Страница задания 2 по теме, связанной с распространением поверхностных плазмон-поляритонов.

На рис. 11 изображена страница задания 2 по теме, связанной с распространением поверхностных плазмон-поляритонов.

Семинар является более творческим заданием, где студентам предлагается не только выполнить самое задание, но и проверить, как выполнили это задание другие студенты.

На рис. 12 изображена страница задания в виде семинара 1 по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

На рис. 13 изображена страница с вопросами семинара 1 по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

Вики представляет собой веб-сайт, содержимое которого пользователи могут самостоятельно изменять с помощью инструментов, предоставляемых самим сайтом.

На рис. 14 изображена страница с заданием заполнения вики-элемента по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

Задача 1.

Учёные физики разработали сверхчувствительный наносенсор на NO_2 , который срабатывает при адсорбции на его поверхности одной молекулы NO_2 . На внутренней поверхности герметичной камеры, расположили чувствительный элемент, содержащей NO_2 . Молекулы NO_2 перемещаются внутри камеры и не сталкиваются друг с другом. При этом, столкновение молекулы со стенками камеры приводит к её «прилипанию» к стенке на время $\Delta\tau = 2$ мс при комнатной температуре (27°C). После этого молекула снова летит в произвольном направлении. Среднее время пролёта молекулы от стенки до стенки равно $2\Delta\tau = 4$ мс. Известно, что сенсор срабатывает в среднем за время $t_c = 1$ мин. За какое время t_h сработает сенсор, если камеру нагреть на 300°C ? Время прилипания экспоненциально зависит от температуры T : $\tau_1 = \tau_{10} \exp(-E_a/kT)$, где E_a – энергия адсорбции, равная 26 мэВ, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж.К – постоянная Больцмана.

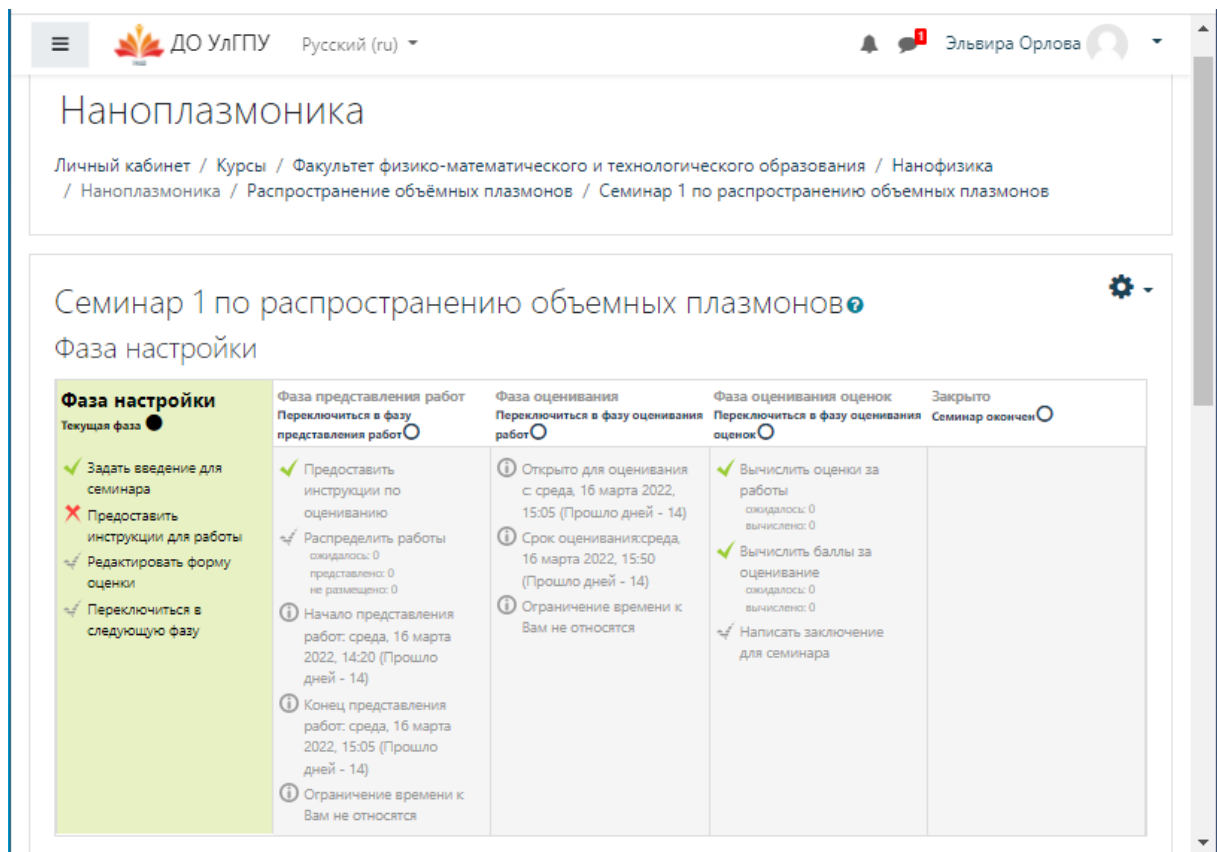


Рис. 12. Страница семинара 1 по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

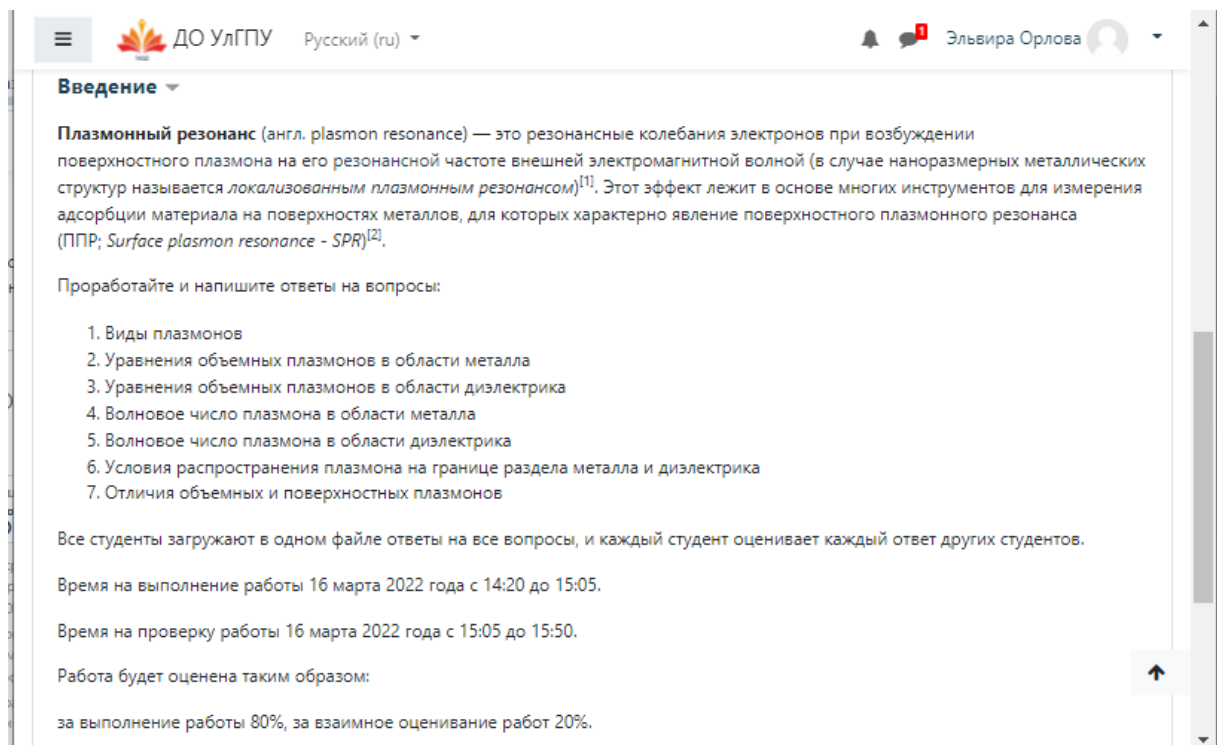


Рис. 13. Страница с вопросами семинара 1 по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

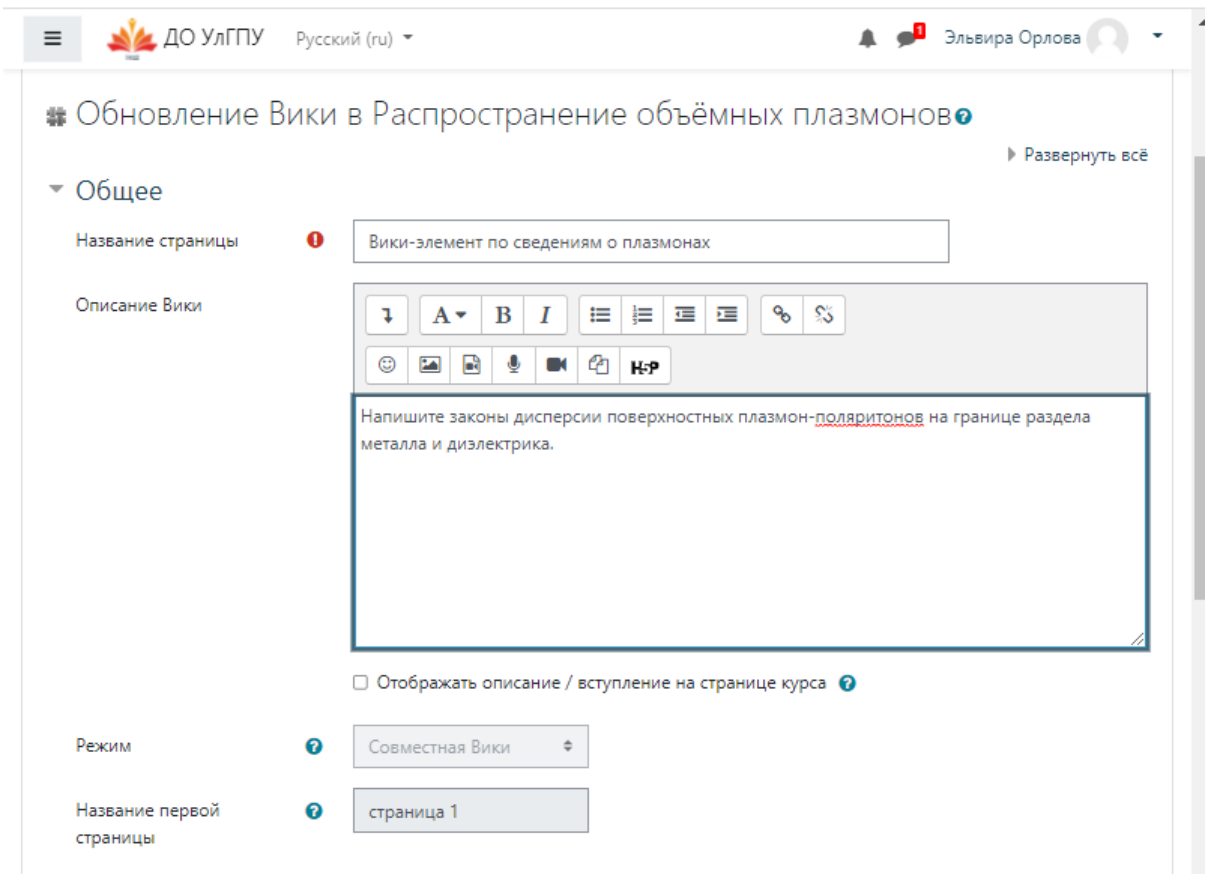


Рис. 14. Страница с заданием заполнения вики-элемента по теме, связанной с распространением плазмон-поляритонов.

Задача оценивается в 20 баллов.

Решение.

В условии задачи была допущена опечатка: более правильная зависимость $\tau_1 = \tau_{10} \exp(+E_a/kT)$, зависимость с минусом – не является физической. Поэтому задачу можно было решить двумя путями, правильными считались оба решения: и для тех, кто пошёл формальным путём и использовал данное выражение, и для тех, кто интуитивно использовал выражение с плюсом. Полное время пролёта и прилипания равно $\tau = \tau_1 + \tau_2 = 6$ мс. Время срабатывания обратно пропорционально числу столкновений и прямо пропорционально времени между столкновениями, то есть $t \approx \tau$. Теперь посмотрим как изменятся τ_1 и τ_2 после нагрева. kT_c при комнатной температуре T_c равно как раз 26 мэВ ($1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 / 1.6 \cdot 10^{-19}$), следовательно при $T_h = 600$ К (то есть, кто принял $T_h = 573$ К, получил на 1 балл меньше), $kT_h = 52$ мэВ (3 балла за корректный перевод энергий в общие единицы измерений). Отсюда отношение времён:

$$\frac{\tau'_1}{\tau_1} = \frac{\exp(\pm E_a/kT_h)}{\exp(\pm E_a/kT_c)} = e^{\pm E_a/kT_h \pm E_a/kT_c}$$

$\tau'_1/\tau_1 = \exp(\pm 0.5)$ (3 балла за формулу). $\tau'_1 = 1.21$ мс для плюса и 3.29 мс для минуса. (2 балла за правильное значение). Время t_2 зависит от скорости, квадрат которой пропорционален температуре, поэтому $\tau_1/\tau'_1 = (T_h/T_c)^{0.5}$ (4 балла), $\tau'_1 = \tau_1/\sqrt{2} = 2.82$ мс (2 балла). Отсюда $\tau' = 4$ мс в первом варианте и $\tau' = 6.12$ мс во втором. Осталось составить пропорцию: $t/\tau = t'/\tau'$ (4 балла):

$$t_h = t_c \frac{\tau_1 \exp(\pm E_a/kT_h \pm E_a/kT_c) + \tau_2 \sqrt{T_c/T_h}}{\tau_1 + \tau_2}$$

Ответ: сенсор сработает за 40 секунд в первом варианте и за 1.02 минуту во втором (2 балла).

Задача 2.

Для создания наночастиц Маша и Петя используют метод лазерной абляции – испарение веществ мишени под действием лазерного импульса, которое затем образует нанокапли, а в дальнейшем – наночастицы. В вакуумной камере абсолютно неупруго сталкиваются две нанокапли массами $m_1 = m$, $m_2 = 2m$, которые летят со скоростью $v = 6$ м/с под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту, и образуется новая нанокапля. Найти скорость новой нанокапли.

Решение.

Воспользуемся законом сохранения импульса. Сначала для горизонтальной составляющей:

$$m_1 v \cos \alpha + m_2 v \cos \alpha = (m_1 + m_2) v'_x$$

$$3mv \cos \alpha = 3mv'_x$$

$$v'_x - v \cos \alpha = v \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Теперь для вертикальной:

$$m_2 v \sin \alpha - m_1 v \sin \alpha = (m_2 - m_1) v'_y$$

$$mv \sin \alpha = 3mv'_y$$

$$v'_y = v \frac{\sin \alpha}{3} = \frac{v}{6}$$

$$v' = v \sqrt{\frac{1}{36} + \frac{3}{4}} = 2\sqrt{7}.$$

Подсчитываем численное значение $v' = 5.3$ м/с.

Задача 3.

Определите величину индукции магнитного поля \mathbf{B} , которое создавала доменная область, если в результате процесса стирания информации через гальванометр протёк заряд $q = 0.1$ нКл. Флюксметр представляет собой прямоугольную медную рамку, подключенную к баллистическому гальванометру. Рамка размерами: 500 нм на 1 мкм. Электрическое сопротивление проволоки $R = 2$ мОм.

Решение:

По закону электромагнитной индукции: $\mathcal{E} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$, и по закону Ома $I = \frac{\mathcal{E}}{R}$. Затем находим поток магнитной индукции по формуле $\Phi = BS$. Заряд: $q = \frac{-\Delta \Phi}{R}$

Окончательно выразим индукцию магнитного поля:

$$B = qR/S = (0.1 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^{-3}) / (10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-7}) = 0.4 \text{ Тл.}$$

Задача 4.

При каком значении сопротивления резонанс в контуре исчезнет, если в цепь последовательно подключены индуктивность, резистор, источник переменного напряжения, а роль обкладок конденсатора выполняет зонд и исследуемая поверхность. Индуктивность равна $L = 0.01$ Гн. Независимым методом определяют значение ёмкости, которое оказалось равным $C = 10^{-10}$ Ф.

Решение.

Максимум в амплитудно-частотной характеристике невозможно будет наблюдать при $\omega_0 = \beta$.

$$\frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{R}{2L}.$$

Ещё можно получить оценку значения из определения добротности. Для предельного случая $Q = 1$.

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = 1,$$

$$R = \frac{2L}{\sqrt{LC}} = \frac{2\sqrt{L}}{\sqrt{C}}.$$

Подсчитаем численное значение $R = 2\sqrt{10^8} = 2 \cdot 10^4$ Ом.

По итогам разработки дистанционного курса по наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE можно сделать вывод о наличии элементов для эффективного контроля знаний по наноплазмонике в составе дистанционного курса в системе управления обучением MOODLE. Созданная система тестов, вопросов и заданий по наноплазмонным системам в системе управления обучением MOODLE позволяет эффективно контролировать изучение материалов курса по наноплазмонике.

Заключение

В настоящей работе проведено всестороннее исследование дистанционного курса по наноплазмонике, созданного в системе управления обучением MOODLE. В работе описан результат разработки дистанционного курса по наноплазмонике, который готов к началу использования в учебном процессе в университете, позволяет автоматизировать проверку знаний по наноплазмонике. Дистанционный курс по наноплазмонике, созданный в системе управления обучением MOODLE, способствует систематизации хранения учебного материала по наноплазмонным системам. При изучении курса наноплазмоники система дистанционного обучения MOODLE привносит то, что кроме основного курса по изучаемой дисциплине, используется материал для подготовки в домашних условиях, который позволяет расширить учебное содержание, а также провести дифференциацию учебного материала в соответствии с индивидуальными потребностями и запросами студентов, изучающих курс. Система управления обучением MOODLE позволяет открывать и закрывать тематические модели в соответствии со временем изучения, что позволяет поддерживать необходимый темп продвижения по курсу по наноплазмонике. В качестве подтверждения гипотезы исследования спроектирован дистанционный курс по наноплазмонике, основанный на комбинации теоретических методов и численных методов в процессе изучения наноплазмоники, позволяющий повысить познавательный интерес студентов к наноплазмонным системам по традиционной, смешанной и дистанционной формам обучения с применением компьютеров. Дистанционный курс по наноплазмонике, созданный в системе управления обучением MOODLE, способен стать эффективным помощником, автоматизирующим наиболее трудоёмкие элементы труда преподавателя в процессе преподавания учебных дисциплин физико-математической направленности. Созданный дистанционный курс по наноплазмонике позволит планировать, организовывать и проводить изучение теоретического материала курса по наноплазмонике в дистанционной или смешанной форме обучения. Разработанный дистанционный курс по наноплазмонике может занять особое место среди дистанционных курсов по физико-математической тематике, предназначенных для студентов физико-математических профилей подготовки университетов.

В связи с возрастающей информатизацией образования идёт внедрение электронных курсов, онлайн-курсов, дистанционных курсов во всех предметных областях. Поэтому разработка курса «Наноплазмоника» представляет практическую значимость для образовательного процесса по физике в университете.

Курс «Наноплазмоника» может быть использован при проведении очных занятий, занятий смешанной формы, дистанционных занятий. Систематизация теории по фи-

зическим основам наноплазмоники позволила наполнить теоретическими материалами курс «Наноплазмоника». Разработаны элементы такие как лекция, тест, задание, семинар, вики для курса «Наноплазмоника», позволяющие контролировать усвоение знаний по физике от репродуктивного до творческого уровня. В составе курса «Наноплазмоника» представлены элементы для проверки теоретических знаний по физическим основам наноплазмоники, позволяющие организовать автоматизированную проверку знаний по физическим основам курса. Наполнен содержанием избранный модуль курса «Наноплазмоника», позволяющий контролировать усвоение знаний по наноплазмонике от репродуктивного до творческого уровня.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. созданные теоретические материалы курса «Наноплазмоника» в системе управления обучения MOODLE позволяют проводить обучение по наноплазмонике в дистанционной и смешанной формах обучения,
2. разработанная модульная структура курса «Наноплазмоника» в системе управления обучением MOODLE позволяет управлять продвижением студентов по курсу «Наноплазмоника»,
3. разработанный дистанционный курс по наноплазмонике готов к началу использования в учебном процессе бакалавриата педагогического университета с профилем подготовки по физике и математике.

Созданный в работе дистанционный курс позволяет эффективно планировать, организовывать и проводить обучение по наноплазмонике. Использование курса по наноплазмонике способствует повышению эффективности самостоятельной работы, обеспечению визуализации процесса обучения, повышению эффективности управления обучением с использованием возможностей системы MOODLE.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если создать и использовать курс «Наноплазмоника», основанный на комбинации теоретических методов и численных методов в процессе изучения наноплазмоники, то можно повысить познавательный интерес к курсу по наноплазмонике и реализовать систему смешанного обучения наноплазмонике, подтверждена полностью.

Список использованных источников

1. Моисеенко И. М., Морозов М. Ю., Попов В. В. Усиление терагерцевых плазмонов в экранированном графене с накачкой оптическими плазмонами // *Нелинейный мир*. — 2018. — Т. 16, № 2. — С. 7–8.
2. Давидович М. В. Дисперсия поверхностных плазмонов в структурах с проводящей плёнкой // *Оптика и спектроскопия*. — 2019. — Т. 126, № 3. — С. 360–369.
3. Ключник А. В., Курганов С. Ю., Лозовик Ю. Е. Плазмоны на отверстиях в экране // *Физика твёрдого тела*. — 2003. — Т. 45, № 9. — С. 1709–1712.
4. Кузнецова Т. И., Распопов Н. А. Схема возбуждения плазмонов на границе металла с фотонным кристаллом // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2014. — Т. 145, № 3. — С. 455–461.
5. Maier S. A. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. — New York : Springer, 2007. — 223 p.
6. Homola Jiri, Yee Sinclair S., Gauglitz Günter. Surface plasmon resonance sensors: review // *Sensors and Actuators B: Chemical*. — 1999. — jan. — Vol. 54, no. 1-2. — P. 3–15. — URL: [https://doi.org/10.1016/s0925-4005\(98\)00321-9](https://doi.org/10.1016/s0925-4005(98)00321-9).

7. Fuchs Sondheimer–Drude Lorentz model and Drude model in the study of SPR based optical sensors: A theoretical study / Nidhi Sharma [et al.] // *Optics Communications*. — 2015. — dec. — Vol. 357. — P. 120–126. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.08.092>.
8. Localized Surface Plasmon Resonance Biosensing: Current Challenges and Approaches / Sarah Unser [et al.] // *Sensors*. — 2015. — jul. — Vol. 15, no. 7. — P. 15684–15716. — URL: <https://doi.org/10.3390/s150715684>.
9. Grosso G., Parravicin G. *Solid State Physics*. — New York : Elsevier, 2014. — 872 p.
10. Crosstalk suppression bandwidth optimisation of a vertically coupled ring resonator add/drop filter / Riyadh Mansoor [et al.] // *IET Optoelectronics*. — 2015. — apr. — Vol. 9, no. 2. — P. 30–36. — URL: <https://doi.org/10.1049/iet-opt.2014.0059>.
11. Cascaded microresonator-based matrix switch for silicon on-chip optical interconnection / Andrew W. Poon [et al.] // *Proceedings of the IEEE*. — 2009. — jul. — Vol. 97, no. 7. — P. 1216–1238. — URL: <https://doi.org/10.1109/jproc.2009.2014884>.
12. Barnes William L., Dereux Alain, Ebbesen Thomas W. Surface plasmon subwavelength optics // *Nature*. — 2003. — aug. — Vol. 424, no. 6950. — P. 824–830. — URL: <https://doi.org/10.1038/nature01937>.
13. Melnyk Andrew R., Harrison Michael J. Theory of optical excitation of plasmons in metals // *Physical Review B*. — 1970. — aug. — Vol. 2, no. 4. — P. 835–850. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.2.835>.
14. Avrutsky Ivan, Soref Richard, Buchwald Walter. Sub-wavelength plasmonic modes in a conductor-gap-dielectric system with a nanoscale gap // *Optics Express*. — 2009. — dec. — Vol. 18, no. 1. — P. 348. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.18.000348>.
15. Graphene plasmonics: a platform for strong light-matter interactions / F.H.L. MinovKoppensich [et al.] // *Optics and Photonics News*. — 2011. — dec. — Vol. 22, no. 12. — P. 36. — URL: <https://doi.org/10.1364/opn.22.12.000036>.
16. He Xiao Yong, Tao Jin, Meng Bo. Analysis of graphene TE surface plasmons in the terahertz regime // *Nanotechnology*. — 2013. — aug. — Vol. 24, no. 34. — P. 345203. — URL: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/34/345203>.
17. 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>.
18. Gate-variable optical transitions in graphene / F. Wang [et al.] // *Science*. — 2008. — mar. — Vol. 320, no. 5873. — P. 206–209. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1152793>.
19. Nonlinear damping in graphene resonators / Alexander Croy [et al.] // *Physical Review B*. — 2012. — dec. — Vol. 86, no. 23. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.86.235435>.
20. Zhang Chao, Chen Lei, Ma Zhongshui. Orientation dependence of the optical spectra in graphene at high frequencies // *Physical Review B*. — 2008. — jun. — Vol. 77, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.77.241402>.

21. A planar electromagnetic “black hole” based on graphene / Yun Jiang [et al.] // *Physics Letters A*. — 2012. — mar. — Vol. 376, no. 17. — P. 1468–1471. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2012.03.018>.
22. Jablan Marinko, Buljan Hrvoje, Soljačić Marin. Plasmonics in graphene at infrared frequencies // *Physical Review B*. — 2009. — dec. — Vol. 80, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.80.245435>.
23. Atwater Harry A. The Promise of Plasmonics // *Scientific American*. — 2007. — apr. — Vol. 296, no. 4. — P. 56–62. — URL: <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0407-56>.
24. Ebbesen Thomas W., Genet Cyriaque, Bozhevolnyi Sergey I. Surface-plasmon circuitry // *Physics Today*. — 2008. — may. — Vol. 61, no. 5. — P. 44–50. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.2930735>.
25. Bozhevolnyi Sergey I. Plasmonic Nano-Guides and Circuits // *Frontiers in Optics 2008/Laser Science XXIV/Plasmonics and Metamaterials/Optical Fabrication and Testing*. — OSA, 2008. — URL: https://doi.org/10.1364/meta_plas.2008.mwd3.
26. Raether H. *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*. — Berlin : Elsevier, 1987. — 140 p.
27. Boardman A. D. *Electromagnetic Surface Modes*. — New York : Wiley, 1982. — 776 p.
28. Zayats Anatoly V., Smolyaninov Igor I. Near-field photonics: surface plasmon polaritons and localized surface plasmons // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. — 2003. — jun. — Vol. 5, no. 4. — P. S16–S50. — URL: <https://doi.org/10.1088/1464-4258/5/4/353>.
29. Zayats Anatoly V., Smolyaninov Igor I., Maradudin Alexei A. Nano-optics of surface plasmon polaritons // *Physics Reports*. — 2005. — mar. — Vol. 408, no. 3-4. — P. 131–314. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.11.001>.
30. Wurtz G. A., Pollard R., Zayats A. V. Optical Bistability in Nonlinear Surface-Plasmon Polaritonic Crystals // *Physical Review Letters*. — 2006. — aug. — Vol. 97, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.97.057402>.
31. Nie S. Probing Single Molecules and Single Nanoparticles by Surface-Enhanced Raman Scattering // *Science*. — 1997. — feb. — Vol. 275, no. 5303. — P. 1102–1106. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.275.5303.1102>.
32. Biosensing with plasmonic nanosensors / Jeffrey N. Anker [et al.] // *Nature Materials*. — 2008. — jun. — Vol. 7, no. 6. — P. 442–453. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat2162>.
33. Optical cloaking with metamaterials / Wenshan Cai [et al.] // *Nature Photonics*. — 2007. — apr. — Vol. 1, no. 4. — P. 224–227. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.28>.
34. Shalaev Vladimir M. Optical negative-index metamaterials // *Nature Photonics*. — 2007. — jan. — Vol. 1, no. 1. — P. 41–48. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2006.49>.

35. Litchinitser Natalia M., Shalaev Vladimir M. Loss as a route to transparency // *Nature Photonics*. — 2009. — feb. — Vol. 3, no. 2. — P. 75–75. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2008.280>.
36. Sandtke M., Kuipers L. Slow guided surface plasmons at telecom frequencies // *Nature Photonics*. — 2007. — sep. — Vol. 1, no. 10. — P. 573–576. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.174>.
37. Electronically Controlled Surface Plasmon Dispersion and Optical Transmission through Metallic Hole Arrays Using Liquid Crystal / Wayne Dickson [et al.] // *Nano Letters*. — 2007. — dec. — Vol. 8, no. 1. — P. 281–286. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl072613g>.
38. Wurtz G.A., Zayats A.V. Nonlinear surface plasmon polaritonic crystals // *Laser & Photonics Review*. — 2008. — jul. — Vol. 2, no. 3. — P. 125–135. — URL: <https://doi.org/10.1002/lpor.200810006>.
39. Plasmon resonances of silver nanowires with a nonregular cross section / Jörg P. Kottmann [et al.] // *Physical Review B*. — 2001. — nov. — Vol. 64, no. 23. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.64.235402>.
40. Noguez Cecilia. Surface plasmons on metal nanoparticles: the influence of shape and physical environment // *The Journal of Physical Chemistry C*. — 2007. — mar. — Vol. 111, no. 10. — P. 3806–3819. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp066539m>.
41. Prodan E. A hybridization model for the plasmon response of complex nanostructures // *Science*. — 2003. — oct. — Vol. 302, no. 5644. — P. 419–422. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1089171>.
42. Optical properties of two interacting gold nanoparticles / W. Rechberger [et al.] // *Optics Communications*. — 2003. — may. — Vol. 220, no. 1-3. — P. 137–141. — URL: [https://doi.org/10.1016/s0030-4018\(03\)01357-9](https://doi.org/10.1016/s0030-4018(03)01357-9).
43. Xiao J. J., Huang J. P., Yu K. W. Optical response of strongly coupled metal nanoparticles in dimer arrays // *Physical Review B*. — 2005. — jan. — Vol. 71, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.71.045404>.
44. Jain Prashant K., Eustis Susie, El-Sayed Mostafa A. Plasmon coupling in nanorod assemblies: optical absorption, discrete dipole approximation simulation, and exciton-coupling model // *The Journal of Physical Chemistry B*. — 2006. — sep. — Vol. 110, no. 37. — P. 18243–18253. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp063879z>.
45. Plasmon resonances of a gold nanostar / Feng Hao [et al.] // *Nano Letters*. — 2007. — mar. — Vol. 7, no. 3. — P. 729–732. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl062969c>.
46. Jain Prashant K., El-Sayed Mostafa A. Universal scaling of plasmon coupling in metal nanostructures: extension from particle pairs to nanoshells // *Nano Letters*. — 2007. — aug. — Vol. 7, no. 9. — P. 2854–2858. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl071496m>.
47. Plasmon slot waveguides: towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization / J. A. Dionne [et al.] // *Physical Review B*. — 2006. — jan. — Vol. 73, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.73.035407>.

48. Squeezing the optical near-field zone by plasmon coupling of metallic nanoparticles / J. R. Krenn [et al.] // *Physical Review Letters*. — 1999. — mar. — Vol. 82, no. 12. — P. 2590–2593. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.82.2590>.
49. Brongersma Mark L., Hartman John W., Atwater Harry A. Electromagnetic energy transfer and switching in nanoparticle chain arrays below the diffraction limit // *Physical Review B*. — 2000. — dec. — Vol. 62, no. 24. — P. R16356–R16359. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.62.r16356>.
50. Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguides / Stefan A. Maier [et al.] // *Nature Materials*. — 2003. — mar. — Vol. 2, no. 4. — P. 229–232. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat852>.
51. Citrin D. S. Coherent excitation transport in metal-nanoparticle chains // *Nano Letters*. — 2004. — aug. — Vol. 4, no. 9. — P. 1561–1565. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl0496791>.
52. Weber W. H., Ford G. W. Propagation of optical excitations by dipolar interactions in metal nanoparticle chains // *Physical Review B*. — 2004. — sep. — Vol. 70, no. 12. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.70.125429>.
53. Plasmonic band gaps and trapped plasmons on nanostructured metal surfaces / T. A. Kelf [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2005. — sep. — Vol. 95, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.95.116802>.
54. Localized and delocalized plasmons in metallic nanovoids / T. A. Kelf [et al.] // *Physical Review B*. — 2006. — dec. — Vol. 74, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.74.245415>.
55. Wiederrecht Gary P., Wurtz Gregory A., Hranisavljevic Jasmina. Coherent coupling of molecular excitons to electronic polarizations of Noble metal nanoparticles // *Nano Letters*. — 2004. — oct. — Vol. 4, no. 11. — P. 2121–2125. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl0488228>.
56. Strong coupling between surface plasmons and excitons in an organic semiconductor / J. Bellessa [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2004. — jul. — Vol. 93, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.93.036404>.
57. Zhang Wei, Govorov Alexander O., Bryant Garnett W. Semiconductor-metal nanoparticle molecules: hybrid excitons and the nonlinear Fano effect // *Physical Review Letters*. — 2006. — oct. — Vol. 97, no. 14. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.97.146804>.
58. Molecular plasmonics with tunable exciton-plasmon coupling strength in J-aggregate hybridized Au nanorod assemblies / Gregory A. Wurtz [et al.] // *Nano Letters*. — 2007. — may. — Vol. 7, no. 5. — P. 1297–1303. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl070284m>.
59. Coherent exciton–surface-plasmon-polariton interaction in hybrid metal-semiconductor nanostructures / P. Vasa [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2008. — sep. — Vol. 101, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.101.116801>.
60. Plexcitonic nanoparticles: plasmon-exciton coupling in nanoshell-J-aggregate complexes / Nche T. Fofang [et al.] // *Nano Letters*. — 2008. — aug. — Vol. 8, no. 10. — P. 3481–3487. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl8024278>.

61. Otto Andreas. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection // Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei. — 1968. — aug. — Vol. 216, no. 4. — P. 398–410. — URL: <https://doi.org/10.1007/bf01391532>.
62. Agranovich V. M., Mills D. L. Surface polaritons. — Amsterdam : North-Holland Publishing Company, 1982. — 717 p.
63. Novotny I., Hecht B. Principles of Nano-Optics. — Cambridge : Cambridge University Press, 2007. — 519 p.

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

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

E-mail: lvrorlova@gmail.com

ORCID iD  0000-0003-2842-0886

Web of Science ResearcherID  ABB-9740-2021

Original article
PACS 42.25.Bs
OCIS 220.2945
MSC 78-11

Development of a distance course on nanoplasmonics in the learning management system MOODLE

K. K. Altunin , E. V. Orlova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted September 11, 2022

Resubmitted September 12, 2022

Published December 12, 2022

Abstract. The result of the development of a modular structure, theoretical materials, control elements of a distance course on nanoplasmonics in the learning management system MOODLE on the educational portal of the university is described. The course on nanoplasmonics is intended for undergraduate students of pedagogical areas of training with a physical and mathematical profile. Theoretical materials on the physical properties of nanosystems with plasmons, in which plasmon-polaritons can propagate, supplement the academic discipline on nanoplasmonics with new scientific information. To fill the course on nanoplasmonics with materials, an analysis of theoretical materials on nanoplasmonics was carried out, new solutions for the layout of theoretical materials were introduced in the form of lectures and presentations on nanoplasmonics. The use of a remote course on nanoplasmonics allows you to store the course materials in a systematic way, as well as organize the verification of tasks for the course of nanoplasmonics. The course of nanoplasmonics provides for intermediate control in the form of passing lectures and classes in subgroups, writing essays, as well as final control in the form of a test. An innovative component of the distance course on nanoplasmonics, created on the learning management system MOODLE, is the expansion of the field of additional subject training for students in nanoplasmonics.

Keywords: nanoplasmonics, plasmon, plasmon-polariton, nanosystem with plasmon, course, distance course, subject training, MOODLE learning management system, organization of task verification, lecture, task

References

1. Moiseenko I. M., Morozov M. Yu., Popov V. V. Amplification of Terahertz Plasmons in Shielded Graphene Pumped by Optical Plasmons // *Nonlinear world*. — 2018. — Vol. 16, no. 2. — P. 7–8.
2. Davidovich M. V. Dispersion of surface plasmons in structures with a conductive film // *Optics and spectroscopy*. — 2019. — Vol. 126, no. 3. — P. 360–369.
3. Klyuchnik A. V., Kurganov S. Yu., Lozovik Yu. E. Plasmons on a hole in the screen // *Solid State Physics*. — 2003. — Vol. 45, no. 9. — P. 1709–1712.

4. Kuznetsova T. I., Raspopov N. A. Scheme of excitation of plasmons at the interface of a metal with a photonic crystal // *Journal of experimental and theoretical physics.* — 2014. — Vol. 145, no. 3. — P. 455–461.
5. Maier S. A. *Plasmonics: Fundamentals and Applications.* — New York : Springer, 2007. — 223 p.
6. Homola Jiri, Yee Sinclair S., Gauglitz Günter. Surface plasmon resonance sensors: review // *Sensors and Actuators B: Chemical.* — 1999. — jan. — Vol. 54, no. 1-2. — P. 3–15. — URL: [https://doi.org/10.1016/s0925-4005\(98\)00321-9](https://doi.org/10.1016/s0925-4005(98)00321-9).
7. Fuchs Sondheimer–Drude Lorentz model and Drude model in the study of SPR based optical sensors: A theoretical study / Nidhi Sharma [et al.] // *Optics Communications.* — 2015. — dec. — Vol. 357. — P. 120–126. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.08.092>.
8. Localized Surface Plasmon Resonance Biosensing: Current Challenges and Approaches / Sarah Unser [et al.] // *Sensors.* — 2015. — jul. — Vol. 15, no. 7. — P. 15684–15716. — URL: <https://doi.org/10.3390/s150715684>.
9. Grosso G., Parravicin G. *Solid State Physics.* — New York : Elsevier, 2014. — 872 p.
10. Crosstalk suppression bandwidth optimisation of a vertically coupled ring resonator add/drop filter / Riyadh Mansoor [et al.] // *IET Optoelectronics.* — 2015. — apr. — Vol. 9, no. 2. — P. 30–36. — URL: <https://doi.org/10.1049/iet-opt.2014.0059>.
11. Cascaded microresonator-based matrix switch for silicon on-chip optical interconnection / Andrew W. Poon [et al.] // *Proceedings of the IEEE.* — 2009. — jul. — Vol. 97, no. 7. — P. 1216–1238. — URL: <https://doi.org/10.1109/jproc.2009.2014884>.
12. Barnes William L., Dereux Alain, Ebbesen Thomas W. Surface plasmon subwavelength optics // *Nature.* — 2003. — aug. — Vol. 424, no. 6950. — P. 824–830. — URL: <https://doi.org/10.1038/nature01937>.
13. Melnyk Andrew R., Harrison Michael J. Theory of optical excitation of plasmons in metals // *Physical Review B.* — 1970. — aug. — Vol. 2, no. 4. — P. 835–850. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.2.835>.
14. Avrutsky Ivan, Soref Richard, Buchwald Walter. Sub-wavelength plasmonic modes in a conductor-gap-dielectric system with a nanoscale gap // *Optics Express.* — 2009. — dec. — Vol. 18, no. 1. — P. 348. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.18.000348>.
15. Graphene plasmonics: a platform for strong light-matter interactions / F.H.L. MinovKoppensich [et al.] // *Optics and Photonics News.* — 2011. — dec. — Vol. 22, no. 12. — P. 36. — URL: <https://doi.org/10.1364/opn.22.12.000036>.
16. He Xiao Yong, Tao Jin, Meng Bo. Analysis of graphene TE surface plasmons in the terahertz regime // *Nanotechnology.* — 2013. — aug. — Vol. 24, no. 34. — P. 345203. — URL: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/34/345203>.
17. 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>.

18. Gate-variable optical transitions in graphene / F. Wang [et al.] // *Science*. — 2008. — mar. — Vol. 320, no. 5873. — P. 206–209. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1152793>.
19. Nonlinear damping in graphene resonators / Alexander Croy [et al.] // *Physical Review B*. — 2012. — dec. — Vol. 86, no. 23. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.86.235435>.
20. Zhang Chao, Chen Lei, Ma Zhongshui. Orientation dependence of the optical spectra in graphene at high frequencies // *Physical Review B*. — 2008. — jun. — Vol. 77, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.77.241402>.
21. A planar electromagnetic “black hole” based on graphene / Yun Jiang [et al.] // *Physics Letters A*. — 2012. — mar. — Vol. 376, no. 17. — P. 1468–1471. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2012.03.018>.
22. Jablan Marinko, Buljan Hrvoje, Soljačić Marin. Plasmonics in graphene at infrared frequencies // *Physical Review B*. — 2009. — dec. — Vol. 80, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.80.245435>.
23. Atwater Harry A. The Promise of Plasmonics // *Scientific American*. — 2007. — apr. — Vol. 296, no. 4. — P. 56–62. — URL: <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0407-56>.
24. Ebbesen Thomas W., Genet Cyriaque, Bozhevolnyi Sergey I. Surface-plasmon circuitry // *Physics Today*. — 2008. — may. — Vol. 61, no. 5. — P. 44–50. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.2930735>.
25. Bozhevolnyi Sergey I. Plasmonic Nano-Guides and Circuits // *Frontiers in Optics 2008/Laser Science XXIV/Plasmonics and Metamaterials/Optical Fabrication and Testing*. — OSA, 2008. — URL: https://doi.org/10.1364/meta_plas.2008.mwd3.
26. Raether H. *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*. — Berlin : Elsevier, 1987. — 140 p.
27. Boardman A. D. *Electromagnetic Surface Modes*. — New York : Wiley, 1982. — 776 p.
28. Zayats Anatoly V., Smolyaninov Igor I. Near-field photonics: surface plasmon polaritons and localized surface plasmons // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. — 2003. — jun. — Vol. 5, no. 4. — P. S16–S50. — URL: <https://doi.org/10.1088/1464-4258/5/4/353>.
29. Zayats Anatoly V., Smolyaninov Igor I., Maradudin Alexei A. Nano-optics of surface plasmon polaritons // *Physics Reports*. — 2005. — mar. — Vol. 408, no. 3-4. — P. 131–314. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.11.001>.
30. Wurtz G. A., Pollard R., Zayats A. V. Optical Bistability in Nonlinear Surface-Plasmon Polaritonic Crystals // *Physical Review Letters*. — 2006. — aug. — Vol. 97, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.97.057402>.
31. Nie S. Probing Single Molecules and Single Nanoparticles by Surface-Enhanced Raman Scattering // *Science*. — 1997. — feb. — Vol. 275, no. 5303. — P. 1102–1106. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.275.5303.1102>.

32. Biosensing with plasmonic nanosensors / Jeffrey N. Anker [et al.] // *Nature Materials*. — 2008. — jun. — Vol. 7, no. 6. — P. 442–453. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat2162>.
33. Optical cloaking with metamaterials / Wenshan Cai [et al.] // *Nature Photonics*. — 2007. — apr. — Vol. 1, no. 4. — P. 224–227. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.28>.
34. Shalaev Vladimir M. Optical negative-index metamaterials // *Nature Photonics*. — 2007. — jan. — Vol. 1, no. 1. — P. 41–48. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2006.49>.
35. Litchinitser Natalia M., Shalaev Vladimir M. Loss as a route to transparency // *Nature Photonics*. — 2009. — feb. — Vol. 3, no. 2. — P. 75–75. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2008.280>.
36. Sandtke M., Kuipers L. Slow guided surface plasmons at telecom frequencies // *Nature Photonics*. — 2007. — sep. — Vol. 1, no. 10. — P. 573–576. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.174>.
37. Electronically Controlled Surface Plasmon Dispersion and Optical Transmission through Metallic Hole Arrays Using Liquid Crystal / Wayne Dickson [et al.] // *Nano Letters*. — 2007. — dec. — Vol. 8, no. 1. — P. 281–286. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl1072613g>.
38. Wurtz G.A., Zayats A.V. Nonlinear surface plasmon polaritonic crystals // *Laser & Photonics Review*. — 2008. — jul. — Vol. 2, no. 3. — P. 125–135. — URL: <https://doi.org/10.1002/lpor.200810006>.
39. Plasmon resonances of silver nanowires with a nonregular cross section / Jörg P. Kottmann [et al.] // *Physical Review B*. — 2001. — nov. — Vol. 64, no. 23. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.64.235402>.
40. Noguez Cecilia. Surface plasmons on metal nanoparticles: the influence of shape and physical environment // *The Journal of Physical Chemistry C*. — 2007. — mar. — Vol. 111, no. 10. — P. 3806–3819. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp066539m>.
41. Prodan E. A hybridization model for the plasmon response of complex nanostructures // *Science*. — 2003. — oct. — Vol. 302, no. 5644. — P. 419–422. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1089171>.
42. Optical properties of two interacting gold nanoparticles / W. Rechberger [et al.] // *Optics Communications*. — 2003. — may. — Vol. 220, no. 1-3. — P. 137–141. — URL: [https://doi.org/10.1016/s0030-4018\(03\)01357-9](https://doi.org/10.1016/s0030-4018(03)01357-9).
43. Xiao J. J., Huang J. P., Yu K. W. Optical response of strongly coupled metal nanoparticles in dimer arrays // *Physical Review B*. — 2005. — jan. — Vol. 71, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.71.045404>.
44. Jain Prashant K., Eustis Susie, El-Sayed Mostafa A. Plasmon coupling in nanorod assemblies: optical absorption, discrete dipole approximation simulation, and exciton-coupling model // *The Journal of Physical Chemistry B*. — 2006. — sep. — Vol. 110, no. 37. — P. 18243–18253. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp063879z>.

45. Plasmon resonances of a gold nanostar / Feng Hao [et al.] // *Nano Letters*. — 2007. — mar. — Vol. 7, no. 3. — P. 729–732. — URL: <https://doi.org/10.1021/n1062969c>.
46. Jain Prashant K., El-Sayed Mostafa A. Universal scaling of plasmon coupling in metal nanostructures: extension from particle pairs to nanoshells // *Nano Letters*. — 2007. — aug. — Vol. 7, no. 9. — P. 2854–2858. — URL: <https://doi.org/10.1021/n1071496m>.
47. Plasmon slot waveguides: towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization / J. A. Dionne [et al.] // *Physical Review B*. — 2006. — jan. — Vol. 73, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.73.035407>.
48. Squeezing the optical near-field zone by plasmon coupling of metallic nanoparticles / J. R. Krenn [et al.] // *Physical Review Letters*. — 1999. — mar. — Vol. 82, no. 12. — P. 2590–2593. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.82.2590>.
49. Brongersma Mark L., Hartman John W., Atwater Harry A. Electromagnetic energy transfer and switching in nanoparticle chain arrays below the diffraction limit // *Physical Review B*. — 2000. — dec. — Vol. 62, no. 24. — P. R16356–R16359. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.62.r16356>.
50. Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguides / Stefan A. Maier [et al.] // *Nature Materials*. — 2003. — mar. — Vol. 2, no. 4. — P. 229–232. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat852>.
51. Citrin D. S. Coherent excitation transport in metal-nanoparticle chains // *Nano Letters*. — 2004. — aug. — Vol. 4, no. 9. — P. 1561–1565. — URL: <https://doi.org/10.1021/n10496791>.
52. Weber W. H., Ford G. W. Propagation of optical excitations by dipolar interactions in metal nanoparticle chains // *Physical Review B*. — 2004. — sep. — Vol. 70, no. 12. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.70.125429>.
53. Plasmonic band gaps and trapped plasmons on nanostructured metal surfaces / T. A. Kelf [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2005. — sep. — Vol. 95, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.95.116802>.
54. Localized and delocalized plasmons in metallic nanovoids / T. A. Kelf [et al.] // *Physical Review B*. — 2006. — dec. — Vol. 74, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.74.245415>.
55. Wiederrecht Gary P., Wurtz Gregory A., Hranisavljevic Jasmina. Coherent coupling of molecular excitons to electronic polarizations of Noble metal nanoparticles // *Nano Letters*. — 2004. — oct. — Vol. 4, no. 11. — P. 2121–2125. — URL: <https://doi.org/10.1021/n10488228>.
56. Strong coupling between surface plasmons and excitons in an organic semiconductor / J. Bellessa [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2004. — jul. — Vol. 93, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.93.036404>.
57. Zhang Wei, Govorov Alexander O., Bryant Garnett W. Semiconductor-metal nanoparticle molecules: hybrid excitons and the nonlinear Fano effect // *Physical Review Letters*. — 2006. — oct. — Vol. 97, no. 14. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.97.146804>.

58. Molecular plasmonics with tunable exciton-plasmon coupling strength in J-aggregate hybridized Au nanorod assemblies / Gregory A. Wurtz [et al.] // Nano Letters. — 2007. — may. — Vol. 7, no. 5. — P. 1297–1303. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl070284m>.
59. Coherent exciton–surface-plasmon-polariton interaction in hybrid metal-semiconductor nanostructures / P. Vasa [et al.] // Physical Review Letters. — 2008. — sep. — Vol. 101, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.101.116801>.
60. Plexcitonic nanoparticles: plasmon-exciton coupling in nanoshell-J-aggregate complexes / Nche T. Fofang [et al.] // Nano Letters. — 2008. — aug. — Vol. 8, no. 10. — P. 3481–3487. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl8024278>.
61. Otto Andreas. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection // Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei. — 1968. — aug. — Vol. 216, no. 4. — P. 398–410. — URL: <https://doi.org/10.1007/bf01391532>.
62. Agranovich V. M., Mills D. L. Surface polaritons. — Amsterdam : North-Holland Publishing Company, 1982. — 717 p.
63. Novotny I., Hecht B. Principles of Nano-Optics. — Cambridge : Cambridge University Press, 2007. — 519 p.

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

Elvira Viacheslavovna Orlova — 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: lvrorlova@gmail.com

ORCID iD  0000-0003-2842-0886

Web of Science ResearcherID  ABB-9740-2021