Физико-математические науки

УДК 535.016

ББК 22.343

Разработка компьютерного сопровождения изучения темы по спайзерам в курсе нанооптики

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

Аннотация. Представлены результаты разработки компьютерного сопровождения изучения темы по спайзерам в курсе по нанооптике в университете. Рассмотрены основные этапы создания сайта по нанооптике от создания сайта, настройки групп пользователей, заполнения содержимым и заключительного структурирования сайта. Разработано схематическое представление современных сведений в теории спайзеров.

Ключевые слова: нанооптика, спайзер, поверхностный плазмон-поляритон, когерентные оптические излучатели, оптические излучатели, электронный образовательный ресурс, электронный курс, сайт, интерактивная презентация.

Результаты разработки и внедрения электронного курса по нанооптике средствами MOODLE описаны в работе [1]. Результаты разработки и внедрения отдельных тем по наноплазмонных материалам и наноматериалам с квазинулевой диэлектрической проницаемостью в составе электронного курса по нанооптике были описаны в [7, 8]. В отличие от работы [2], в которой для разработки электронного образовательного ресурса используются инструменты Google Site и MOODLE, в настоящей работе используются инструменты Microsoft Share Point.

В настоящей работе представлены результаты разработки компьютерного сопровождения изучения темы по спайзерам в курсе по нанооптике в университете. Рассмотрены основные этапы создания сайта для поддержки изучения курса по нанооптике. Этапы создания компьютерного сопровождения изучения избранной темы по спайзерам включают в себя создание сайта, настройки групп пользователей, заполнение содержимым сайта и заключительного структурирования сайта по теме из курса по нанооптике. Разработано визуальное представление современных сведений теории спайзеров в виде схемы.

Нанооптика является быстрорастущей областью исследований в области оптической конденсированной материи. Всё новые и новые идеи идут как теоретически, так и экспериментально, чтобы сосредоточить оптическую энергию на субволновых (несколько десятков нанометров) размерах.

Поверхности металлов и их границы раздела с диэлектриками поддерживают электромагнитные возбуждения, известные как поверхностные плазмон-поляритоны или короткоповерхностные плазмоны. Их поле локализовано вблизи границы раздела в узкой области толщины, которая меньше длины волны оптического излучения. Это замечательное свойство было использовано в большом количестве металлических наноструктур для создания, контроля и управления электромагнитными полями на наномасштабе, который является предметом плазмоники.

Недавний прогресс в области нанотехнологий привёл к возможности манипулирования оптическими полями на наноуровне. Сильно локализованные электромагнитные колебания могут возбуждаться на металлических поверхностях и поверхностях металл-диэлектрик, что позволяет формировать сильно локализованные электромагнитные колебания путём изготовления соответствующих металлических наноструктур.

Наноскопические источники когерентных электромагнитных полей являются важными элементами для различных областей в нанооптике, таких как наноплазмоника, метаматериалы и квантовая плазмоника. Поверхностный

плазмонный лазер (спайзер) может быть таким наноскопическим источником. Основываясь на сильных взаимодействиях между наноразмерными излучателями и локализованными поверхностными плазмонами, этот вид лазеров также называется «спайзер» (сокращение поверхностного плазмонного усиления за счёт вынужденного излучения), который может генерировать когерентные плазмонные поля в субволновых областях.

Спайзеры представляют собой новые когерентные оптические излучатели на поверхностных плазмон-поляритонах. Спайзеры являются новым видов когерентных оптических излучателей. Генерация оптического излучения в спайзерах идёт в наноструктурных элементах спайзеров.

Теория распространения поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела двух нанокомпозитных сред с наночастицами развивалась в работах [3-6].

В работе [9] сделан шаг к квантовой наноплазмонике, в которой поверхностные плазмонные поля наносистемы квантуются и рассматриваются их стимулированное излучение. Спайзер вводится как квантовый генератор для поверхностных плазмонных квантов, в котором явление поверхностного плазмонного усиления происходит за счёт вынужденного излучения. Спайзер генерирует временные когерентные высокоинтенсивные поля выбранных поверхностных плазмонных мод, которые могут быть сильно локализованы на наномасштабе, включая темновые моды, которые не связаны с дальнозонными электромагнитными полями. После открытия спайзера (усиление поверхностного плазмона путём вынужденного излучения), впервые предложенного Бергманом и Штокманом в 2003 году, стало возможным доставлять оптическую энергию за пределы дифракции и генерировать интенсивный источник оптического поля. Спайзер — наноплазмонный аналог лазера. Одним из основных преимуществ спайзера является его размер: спайзер — поистине наноскопическое устройство, размер которого можно уменьшить меньше, чем глубина скин-слоя материала до размера, такого как радиус нелокальности (порядка нескольких нанометров).

В работе [18] изучается влияние нерезонансных плазмонных мод на порог спайзера в напыляемых наночастицах для получения порогового условия спайзера, учитывающего усиление связи с плазмонами более высокого порядка. Такая связь возникает из-за неоднородности распределения усиления вблизи поверхности металла и приводит к восходящему сдвигу частоты спайзера и порога инверсии населённости. Этот эффект похож, хотя и значительно слабее, на тушение флуоресценции, усиленной плазмоном, вблизи металлических наноструктур из-за возбуждения внерезонансных мод с широкой спектральной полосой.

В работе [10] из первых принципов развита полностью аналитическая квазиклассическая теория кооперативных оптических процессов, происходящих в ансамбле молекул, внедрённых в сферическую наночастицу из ядра и оболочки. Исследованы как плазмонный эффект Дикке, так и генерация спайзера для конструкций, в которых оболочка и ядро содержат сколь угодно большое количество активных молекул вблизи металлического ядра и оболочки. Существенным аспектом теории является учёт обратной связи от границ ядра и оболочки, которая существенно изменяет молекулярную динамику. Теория обеспечивает строгие, хотя и простые и физически прозрачные критерии, как для плазменного сверхизлучения, так и для образования поверхностного плазмона.

В работе [11] предсказан новый эффект самовозбуждения поверхностных плазмонов в плазмонной нанокавитации, и его теория развивается из первых принципов. Предполагается, что полость образована наноразмерным устройством между двумя металлами и содержит поляризуемые включения. На основе функции Грина для структуры исследуются уравнения для поля в полости. При определённых условиях поле становится неустойчивым, что приводит к его самовозбуждению. Пороговый критерий самовозбуждения, а также частота автоколебаний выводятся в аналитической форме. Эффект самовозбуждения поверхностных плазмонов объясняется с точки зрения положительной обратной связи для поляризации включений, обеспечиваемых

полем, отражённым от стенок полости. Эти данные свидетельствуют о принципиально новом способе получения поверхностного плазмона, который не использует стимулированное излучение и отличается от спайзера или плазмонного лазера.

В работе [12] показано, что чистое усиление поверхностных плазмонов достигается в кольцевом канале в металлической пластине из-за безызлучательного возбуждения квантовыми точками. Это делает возможными линии пропускания плазмы без потерь в канале, а также усиление и образование когерентных поверхностных плазмонов.

В работе [13] предложена квазиклассическая аналитическая модель сферических плазменных лазеров без использования одномодовых аппроксимаций, следуя полностью электромагнитной теории Ми. Это позволяет учитывать реалистичные коэффициенты релаксации усиления, которые до сих пор широко недооцениваются. В частности, режимы более высокого порядка могут подорвать и даже обратить вспять благоприятные эффекты сильного эффекта Перселла в таких системах. Такая модель даёт чёткое представление о требованиях к усилению и резонатору, а также о выходных характеристиках, которые помогут экспериментаторам разработать более эффективные спайзеры на основе частиц.

В работе [14] одновременно демонстрируется улучшенная отражательная способность и коэффициент пропускания более 35 дБ для поведения лазерного генератора в активном метаматериале, состоящем из полости генерации в виде эквивалентной активной плёнки с дисперсией Лоренца для показателя преломления.

В работе [15] установлены условия генерации спайзера для нелокальных плазмонных лазеров и нелокальных плазменно-ядерных лазеров на основе полноволновой нелокальной теории Ми. Требуемый порог усиления и коэффициент преломления коэффициента усиления становятся большими, когда учитывается нелокальность или пространственная дисперсия для ультрамалых наночастиц. Нелокальность для компактных наночастиц будет

иметь большое значение при разработке спайзеров на основе ультрамалых наночастиц.

В работе [17] предложен оптико-накачиваемый наноспайзер на основе трёхмерных топологических изоляторов и использует поверхность как источник для плазмонов и её объём в качестве усиливающей среды. Индуцирование населения получается в объёме, и излучательная энергия экситонной рекомбинации переносится в поверхностные плазмоны того же материала, чтобы стимулировать действие спайзеров. Это действительно наноразмерный спайзер, поскольку он использует один и тот же материал для двойных целей.

В работе [16] теоретически исследована работа поверхностного плазмонного усиления путём вынужденного излучения нанолазера на основе излучения (спайзер), а также обнаружено, что частота генерации претерпевает сдвиг по мере увеличения интенсивности генерации, что согласуется с недавними экспериментами.

В работе [19] показано, что в зависимости от значений констант связи могут быть реализованы два сценария для стационарного поведения цепи взаимодействующих спайзеров: (1) все спайзеры синхронизируются и осциллируют с уникальной фазой или (2) нелинейная автоволна движется вдоль цепи. В последнем сценарии бегущая волна гармонична, в отличие от возбуждений в других известных нелинейных системах. Из-за нелинейного характера системы любое начальное распределение состояний спайзера переходит в одно из этих стационарных состояний.

В работе [20] предлагается поверхностное плазмонное усиление путём вынужденного излучения (спайзера) в нанопластинах: линейные центрально-симметричные цепи металлических наносфер, встроенные в активную среду квантовых точек. Преимущественно усиливаются темновые, нечётные собственные моды, которые не страдают от дипольно-радиационных потерь и создают когерентные локальные оптические поля, сравнимые по силе с атомными полями, с минимальным дальним полевым излучением. Есть много

перспективных приложений в наноразмерной оптоэлектронике для таких когерентных оптических излучателей на поверхностных плазмон-поляритонах, как спайзеры.

Рассмотрим основные этапы разработки электронного образовательного ресурса для компьютерного сопровождения изучения темы по спайзерам в курсе нанооптики. Рассмотрим этап создания сайта по наноптике. На рис. 1 изображена страница создания электронного образовательного ресурса в виде сайта по нанооптике средствами Share Point в системе Intranet Academic.

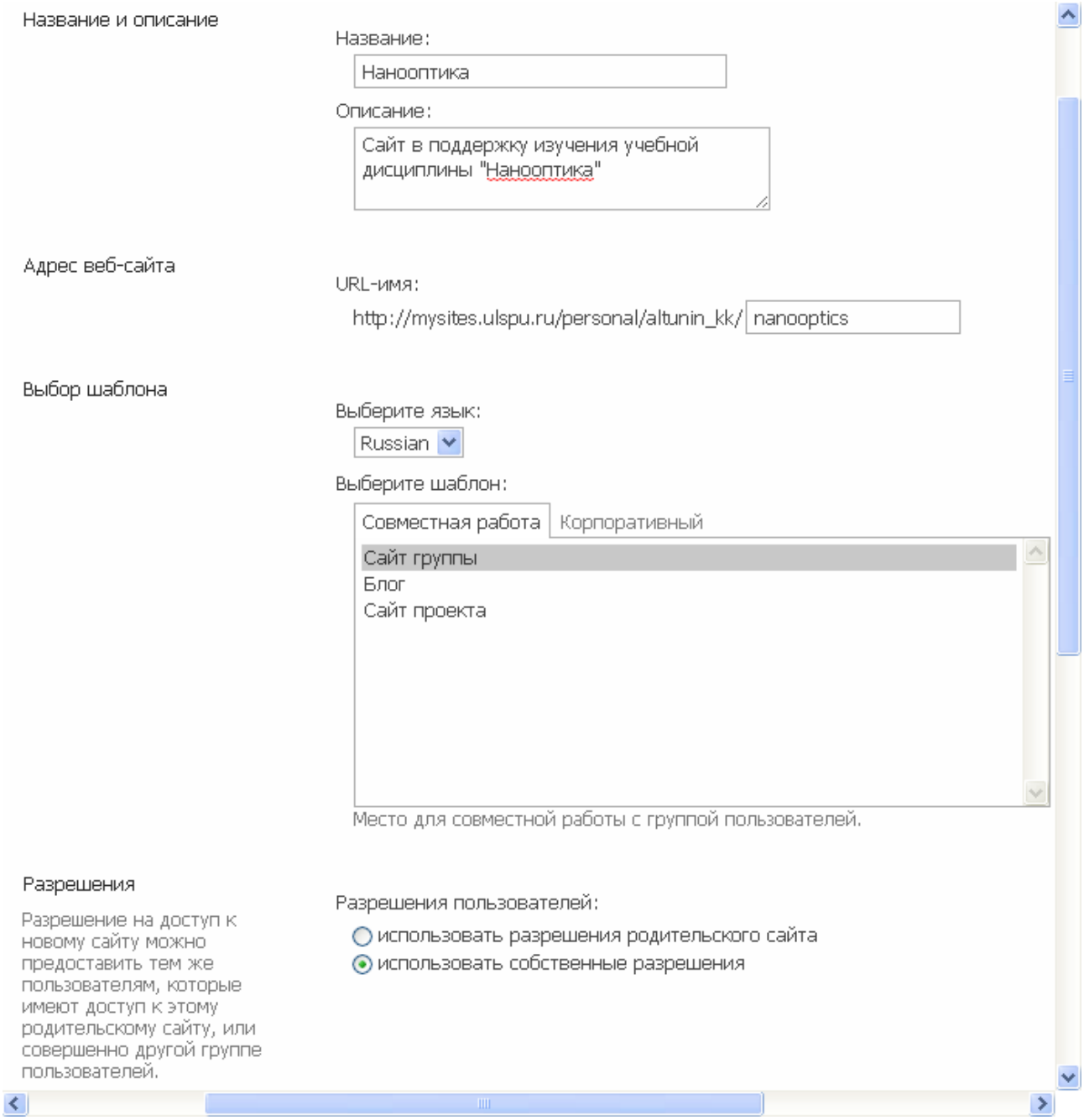

Рис. 1. Страница создания сайта по нанооптике средствами Share Point в

системе Intranet Academic.

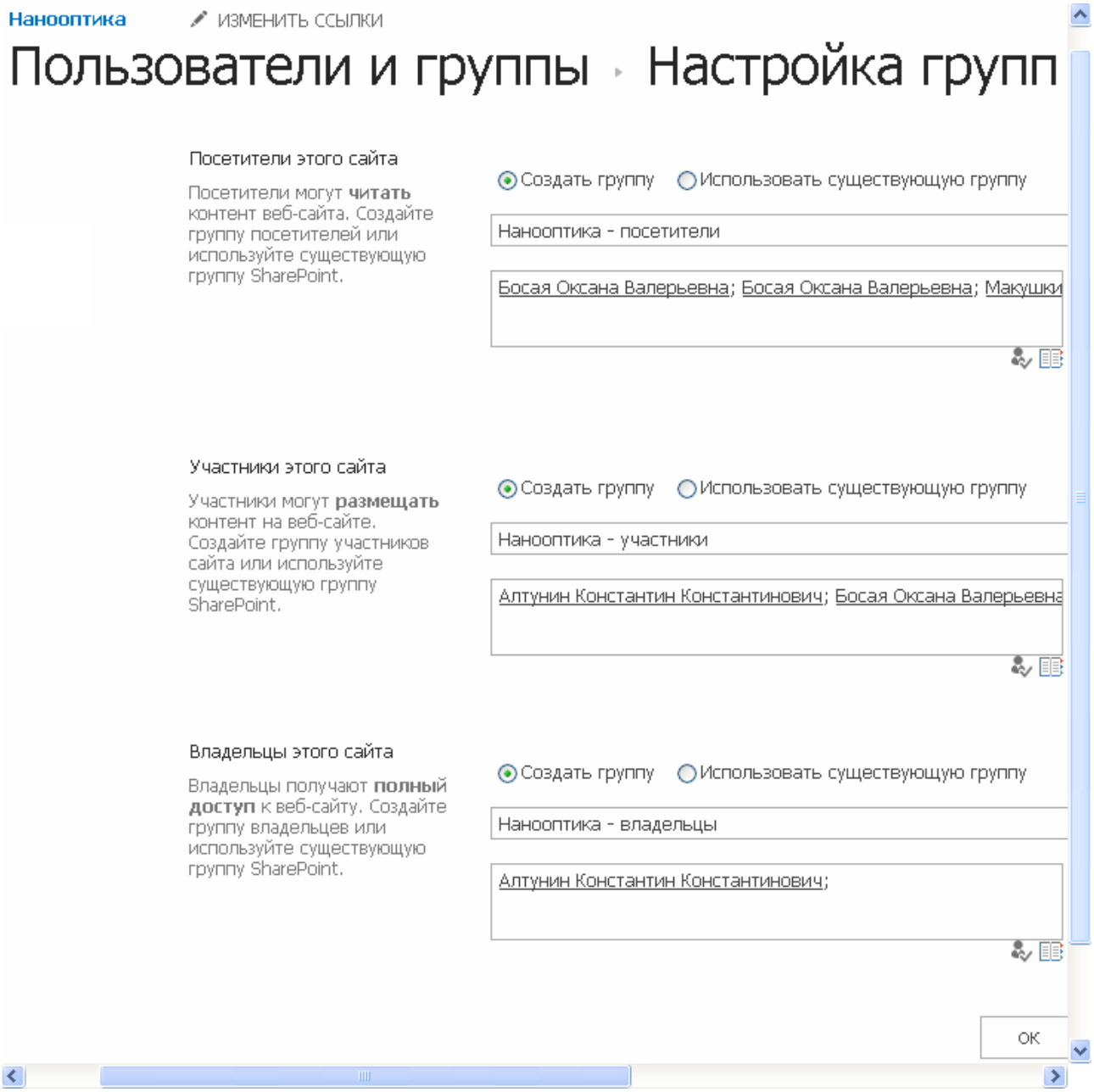

Рис. 2. Страница настройки пользователей групп сайта по нанооптике средствами Share Point в системе Intranet Academic.

Рассмотрим этап настройки групп пользователей сайта по нанооптике. На рис. 2 изображена страница настройки пользователей групп сайта по нанооптике средствами Share Point в системе Intranet Academic.

Рассмотрим этап создания заполнения содержимым сайта по наноптике.

На рис. 3 изображена страница настройки содержимого сайта по нанооптике средствами Share Point в системе Intranet Academic.

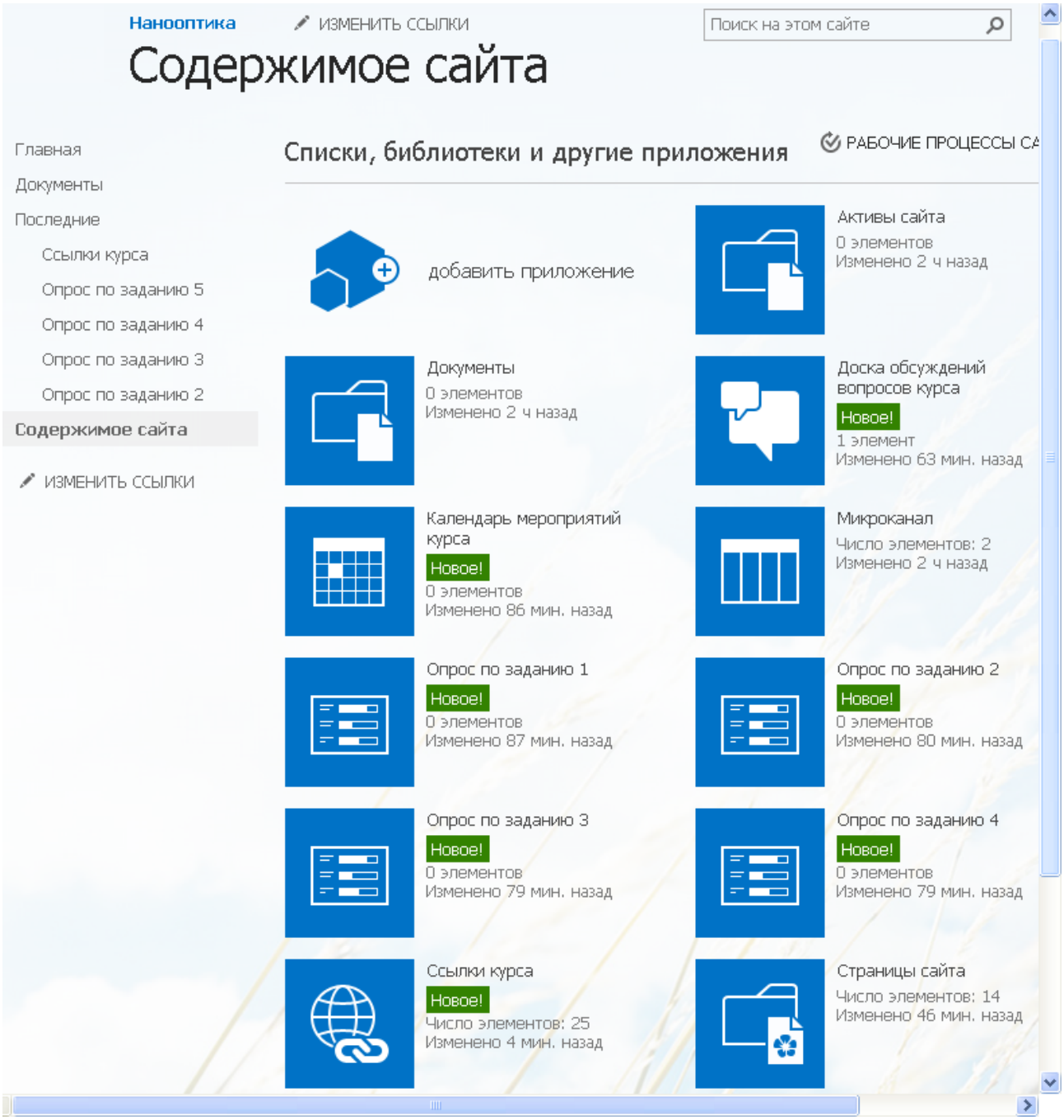

Рис. 3. Страница настройки содержимого сайта по нанооптике средствами Share Point в системе Intranet Academic.

На рис. 4. изображена страница списка гиперссылок на внешние ресурсы в составе курса по нанооптике, созданная средствами Share Point в системе Intranet Academic.

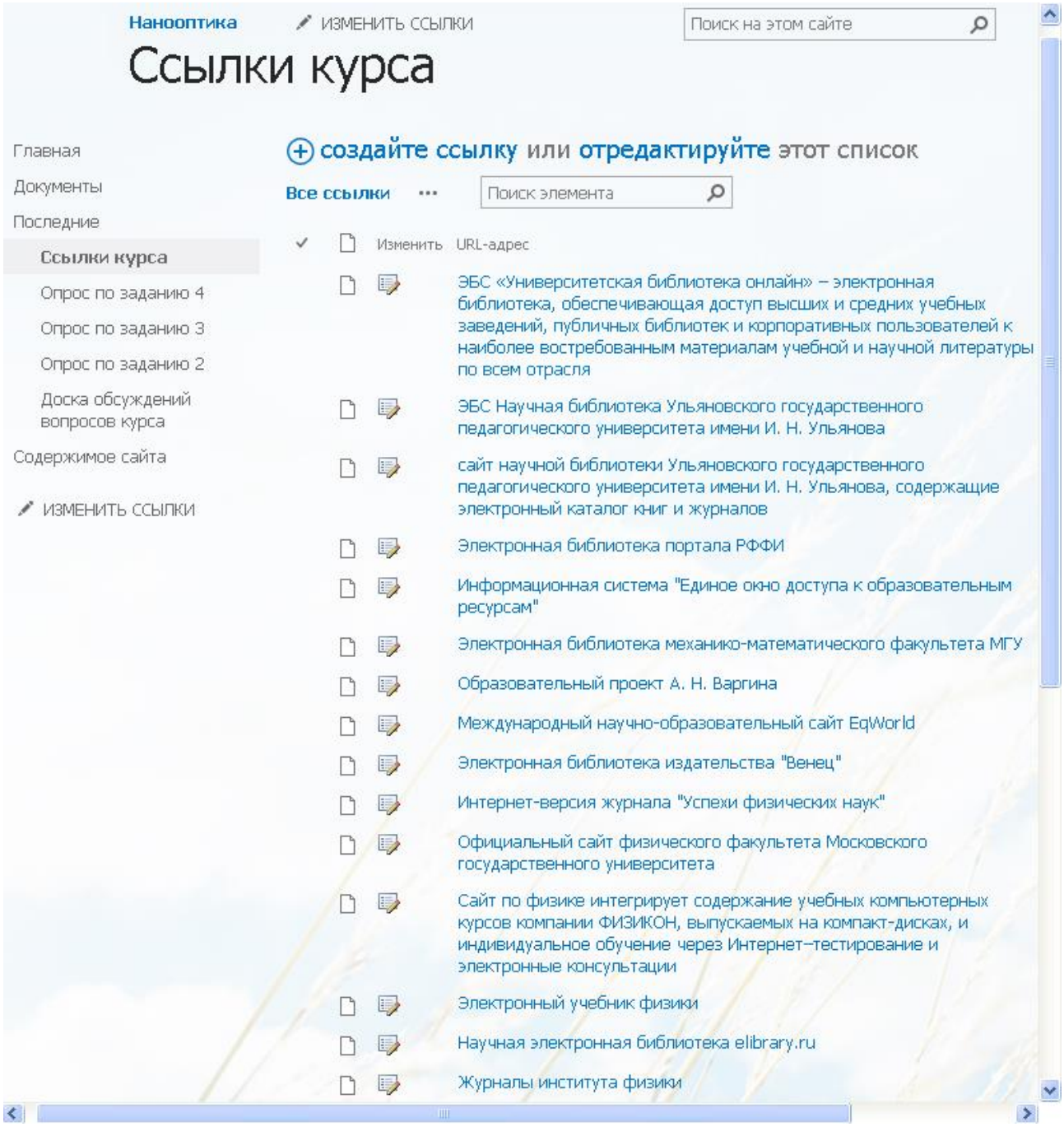

Рис. 4. Страница списка ссылок курса по нанооптике, созданная средствами Share Point в системе Intranet Academic.

В системе Intranet Academic можно создавать гипертекстовые страницы с учебными материалами по нанооптике для учащихся. На рис. 5 изображена страница списка тематических страниц сайта по курсу нанооптики, созданная средствами Share Point в системе Intranet Academic. В системе Intranet Academic можно размещать учебные материалы в виде файлов и

гипертекстовых страниц.

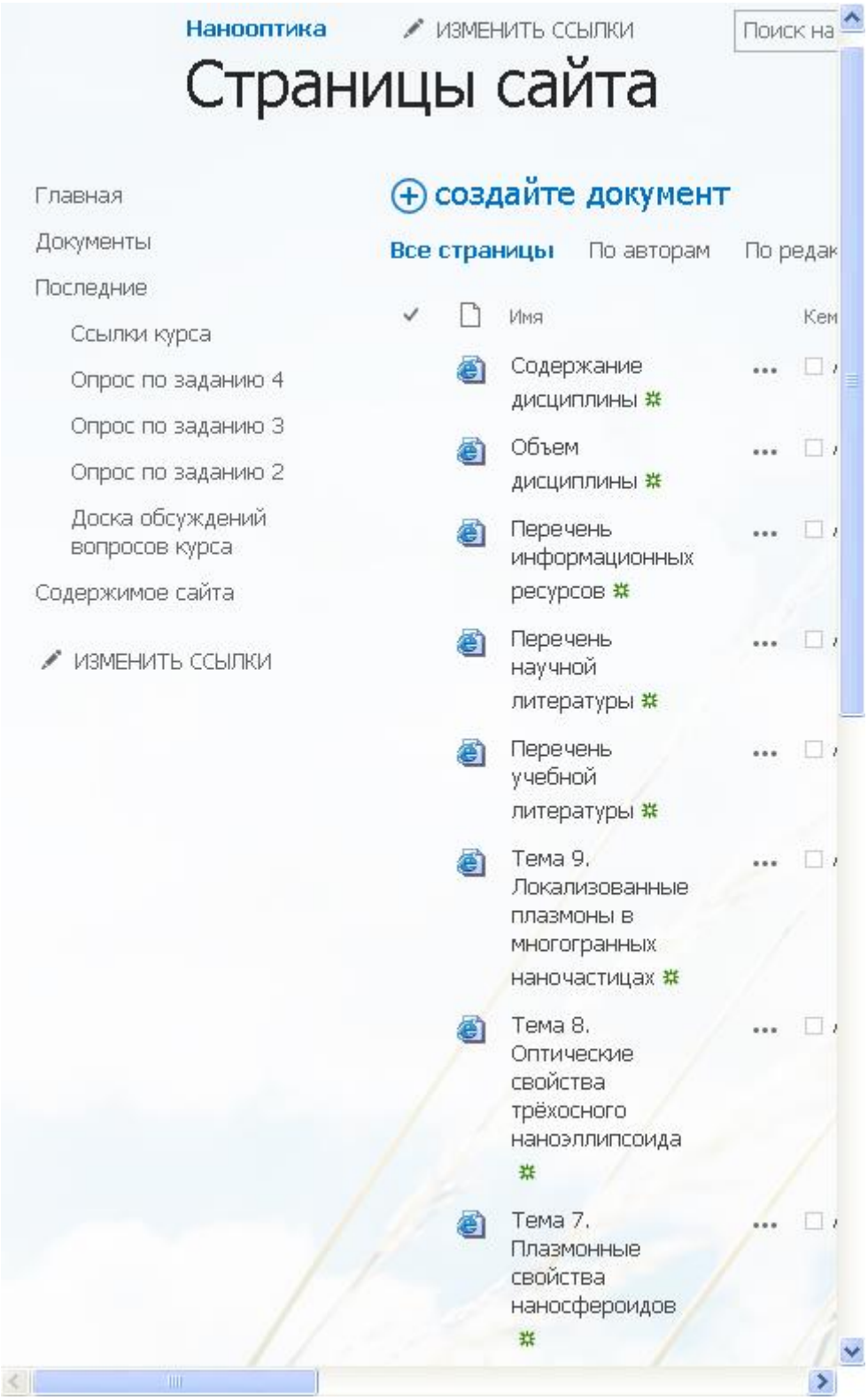

Рис. 5. Страница списка тематических страниц сайта по нанооптике, созданная средствами Share Point в системе Intranet Academic.

На рис. 6 изображена страница с перечнем материалов по нанооптике для

учащихся в системе Intranet Academic.

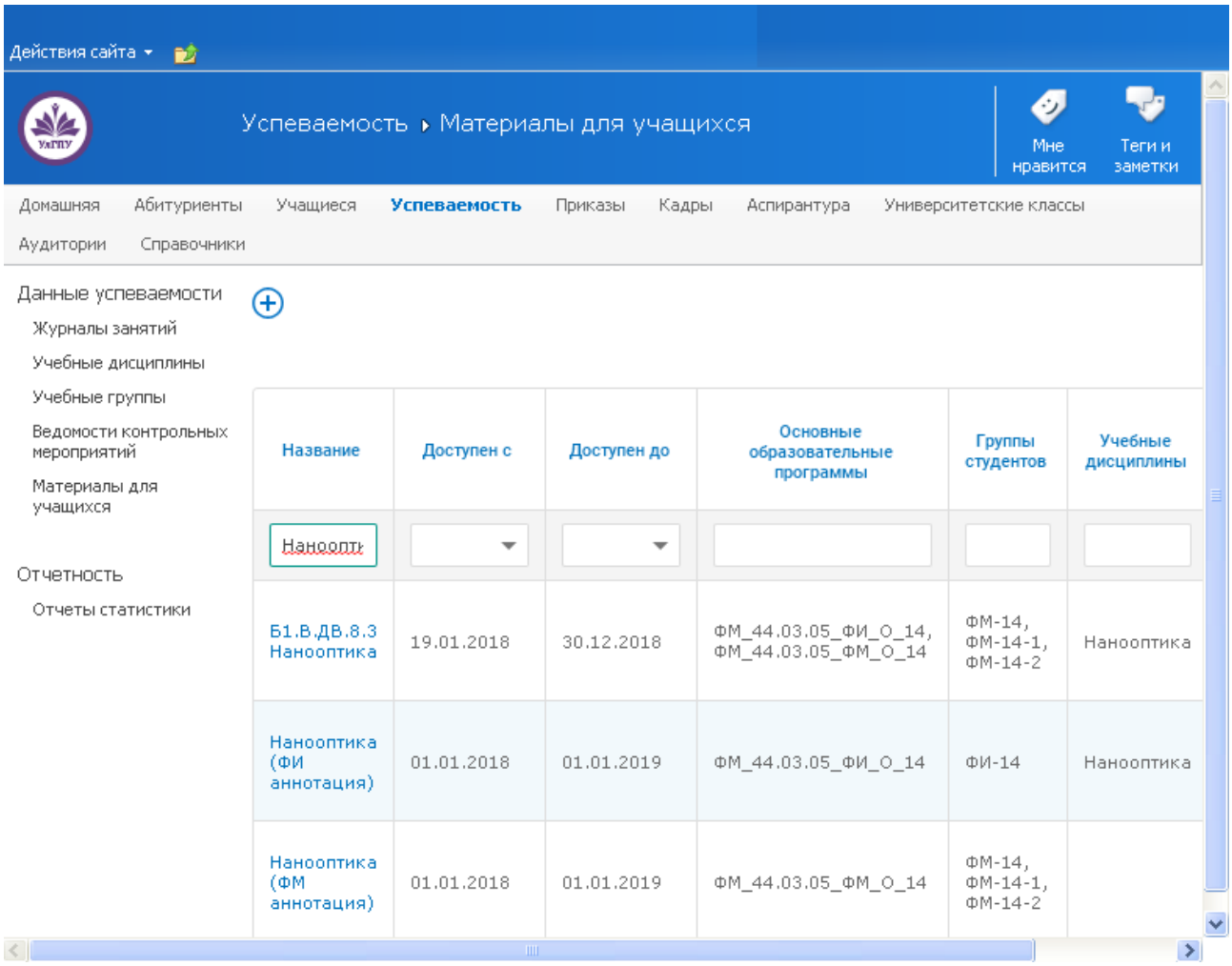

Рис. 6. Страница с перечнем материалов по нанооптике для учащихся в системе Intranet Academic.

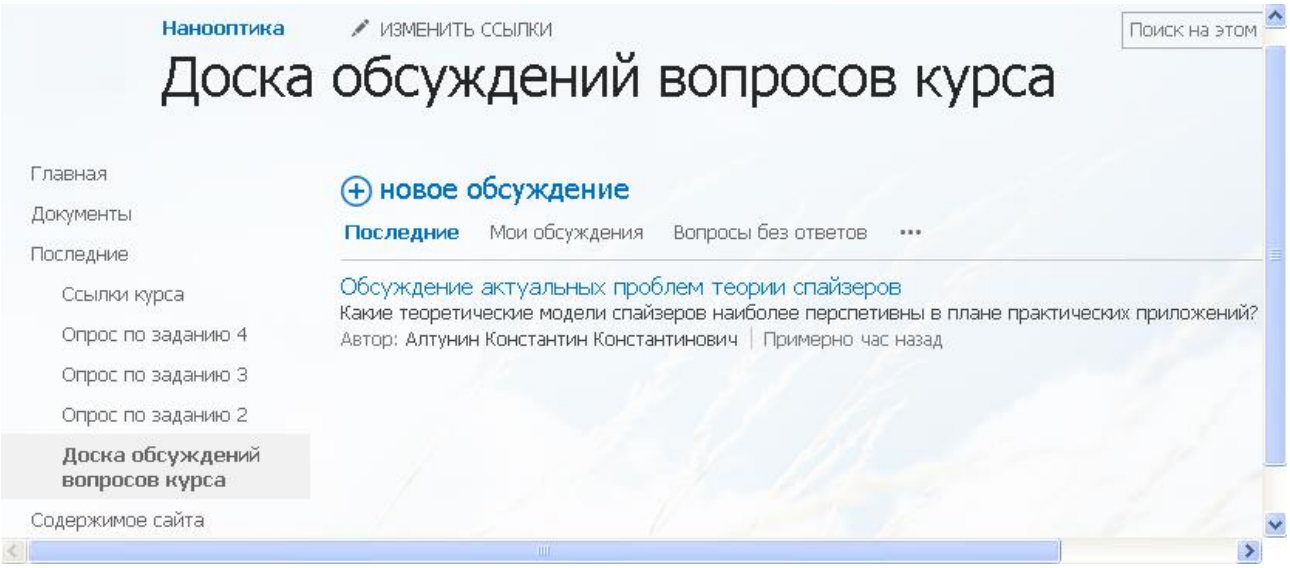

Рис. 7. Страница доски обсуждений вопросов курса по нанооптике, созданная средствами Share Point в системе Intranet Academic.

В системе Intranet Academic можно организовать обсуждение вопросов изучаемого курса по нанооптике. На рис. 7. изображена страница доски обсуждений вопросов курса по нанооптике, созданная средствами Share Point в системе Intranet Academic.

В системе Intranet Academic можно размещать документы с материалами курса по нанооптике, которые могут быть упорядочены определённым образом. Ссылки на эти документы могут быть использованы на страницах курса по нанооптике. На рис. 8 изображена страница доски обсуждений вопросов курса по нанооптике, созданная средствами Share Point в системе Intranet Academic.

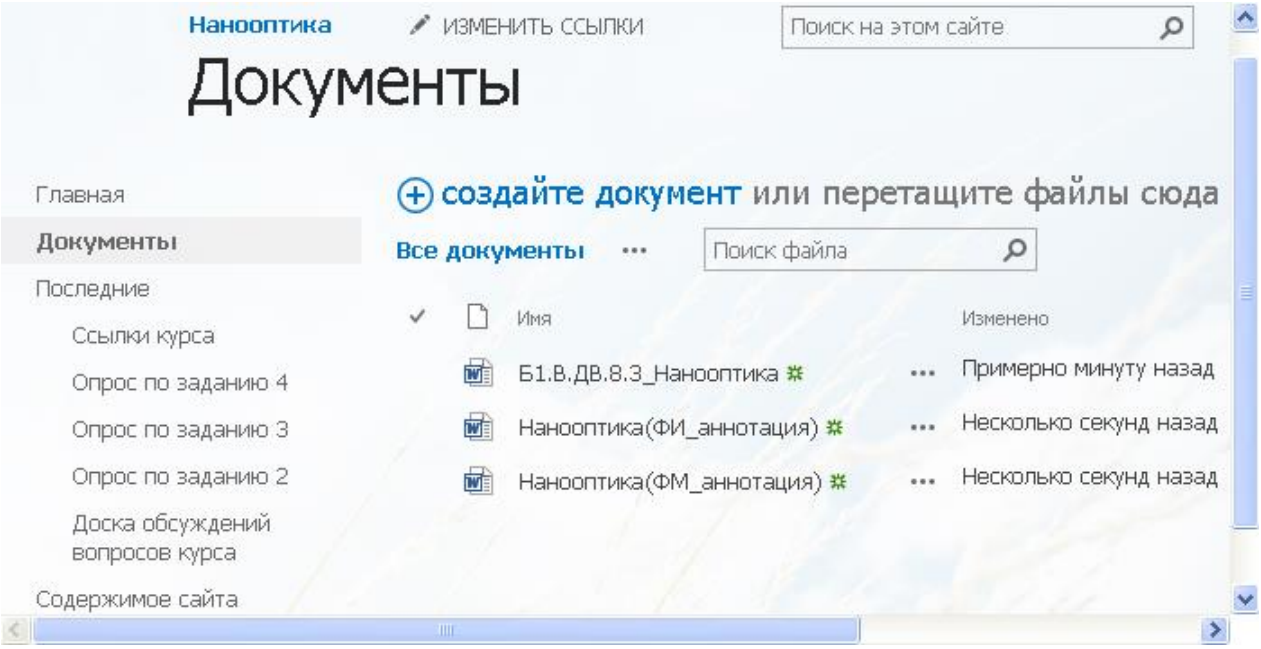

Рис. 8. Страница доски обсуждений вопросов курса по нанооптике, созданная средствами Share Point в системе Intranet Academic.

На рис. 9. изображена главная страница курса по нанооптике, созданная средствами Share Point в системе Intranet Academic. На главной странице могут быть выведены различные элементы содержимого сайта. В данном случае на главной странице курса по нанооптике выведен календарь мероприятий курса.

Рассмотрим схематическое представление современных сведений в

теории спайзеров. На рис. 10 изображена схема представления основных современных направлений в теории спайзеров, связанных с построением моделей, изучением эффектов и поиском реализаций спайзеров.

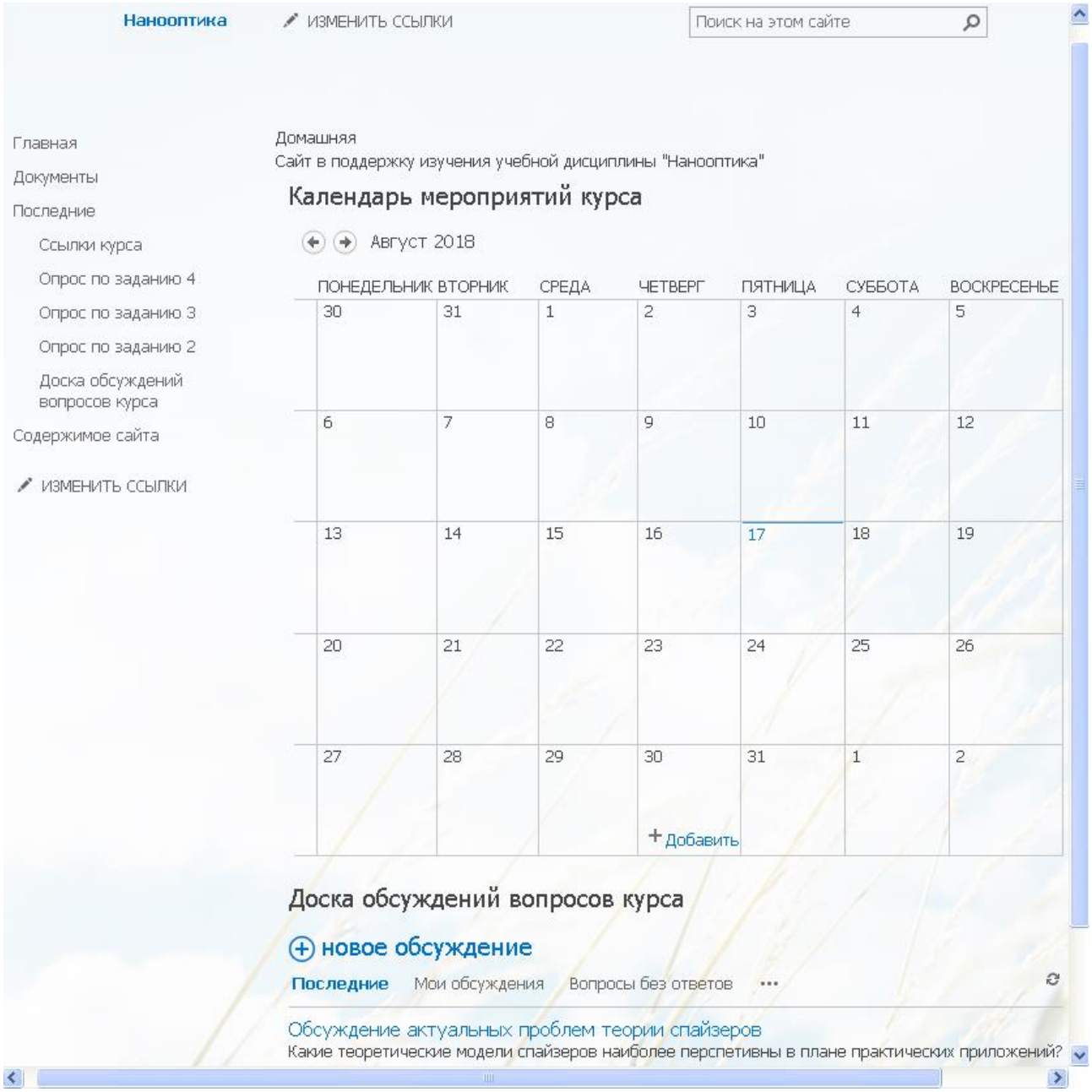

Рис. 9. Главная страница курса по нанооптике, созданная средствами Share Point в системе Intranet Academic.

При изучении темы по спайзерам необходимо придерживаться схемы представления современных направлений. На рис. 11 изображена страница презентации с тестовым заданием с множественным выбором ответа для

интерактивной доски Panasonic по теории спайзеров в курсе по нанооптике.

Рис. 10. Схема представления основных современных направлений в теории спайзеров, связанных с построением моделей, изучением эффектов и поиском реализаций спайзеров.

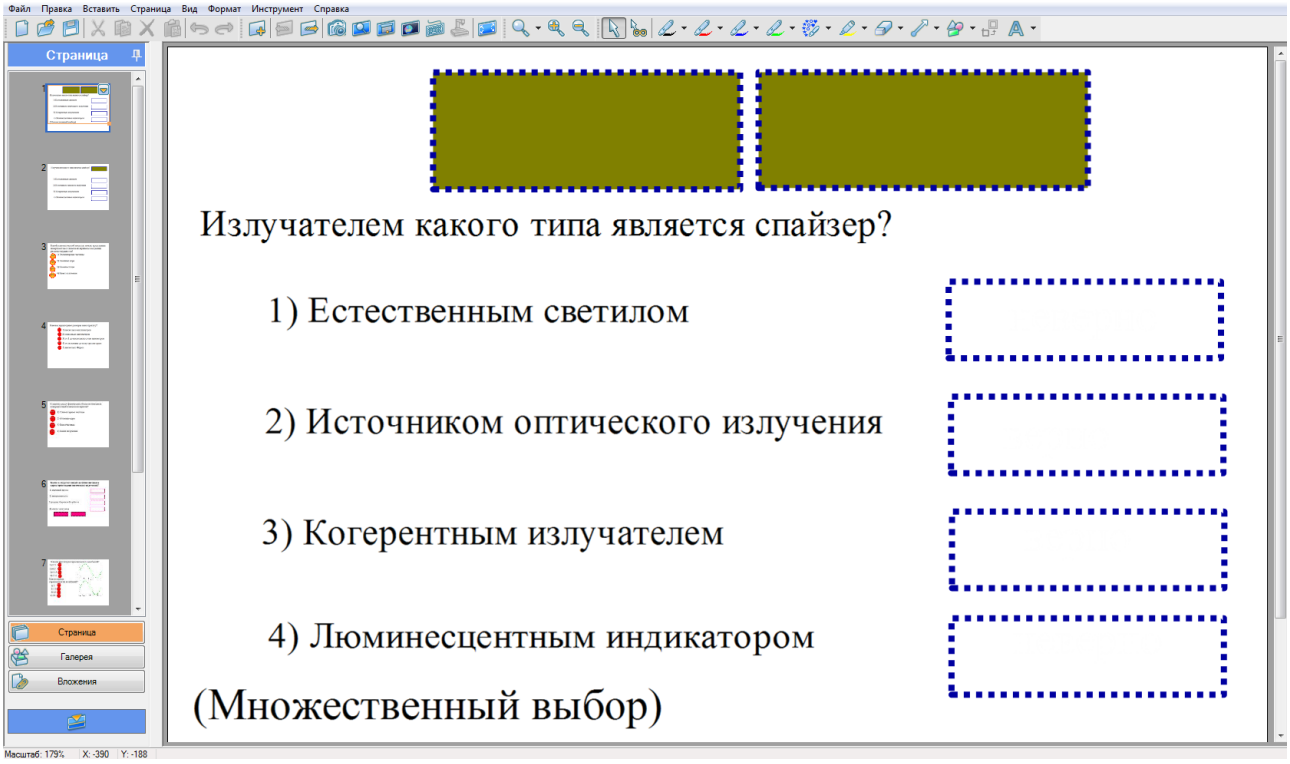

Рис. 11. Страница презентации для интерактивной доски Panasonic по теории

спайзеров в курсе нанооптики.

В таблице 1 приведены результаты первого этапа педагогического эксперимента по нанооптике, проведённого с 24.03.2015 по 26.06.2015 в рамках дисциплины по выбору со студентами из групп ФМ-11 и ФИ-11. Эту группу выбираем в качестве контрольной группы. Первый этап педагогического эксперимента в рамках изучения курса по нанооптике проводился без использования таких информационных технологий, как электронные образовательные ресурсы и интерактивные презентации. Перевод итоговой суммы баллов в итоговую оценку производился по шкале: от 181 до 200 баллов соответствует оценке 5, от 141 до 180 баллов соответствует оценке 4, от 61 до 140 баллов соответствует оценке 3, от 0 до 60 баллов соответствует оценке 2. Средний уровень обученности студентов по нанооптике в 2015 году составляет 67 %.

Таблица 1. Результаты педагогического эксперимента в рамках курса по нанооптике в 2015 году.

Студенты	Текущая сумма	Зачёт	Итоговая сумма	Итоговая оценка
Хамзина Линара	117	32	149	4
Хорошилова Мария	141	32	173	4
Юртаева Надежда	153	32	185	5
Коннова Татьяна	51	32	83	3
Реброва Ксения	60	1	61	3
Демидов Николай	162	32	194	5
Бертасова Ольга	60	1	61	3
Берхеева Лилия	60	1	61	3
Гурьянова Виктория	162	32	194	5
Кузина Татьяна	152	32	184	5

Сидоренко Глеб	60	1	61	3

Таблица 2. Результаты педагогического эксперимента в рамках курса по нанооптике в 2018 году.

Студенты	Текущая сумма	Зачёт	Итоговая сумма	Итоговая оценка
Босая Оксана	168	32	200	5
Бурмистрова Наталья	168	32	200	5
Макушкина Ксения	168	32	200	5
Серова Дарья	168	32	200	5
Карташова Алеся	141	25	166	4
Ефремов Кирилл	168	32	200	5
Хусаинова Алина	168	32	200	5
Цыганков Андрей	74	1	75	3
Корняков Василий	63	1	64	3
Халимов Тимур	69	1	70	3
Алеев Раиль	97	1	98	3
Карандасов Кирилл	69	1	70	3
Чертыковцев Александр	61	0	61	3

В таблице 2 приведены результаты второго этапа педагогического эксперимента по нанооптике, проведённого с 14.03.2018 по 30.05.2018 в рамках дисциплины по выбору со студентами из группы ФМ-14. Эту группу выбираем в качестве экспериментальной группы. Второй этап педагогического эксперимента по нанооптике проводился с использованием таких информационных технологий, как электронные образовательные ресурсы, презентации и интерактивные презентации. Студенты изучали электронный курс по нанооптике, созданный преподавателем, а также создавали свои электронные курсы по избранной теме нанооптике. Средний

уровень обученности студентов по нанооптике в 2018 году составляет 68 %. Средний уровень обученности студентов по нанооптике в экспериментальной группе остался на прежнем уровне по сравнению с контрольной группой. Поэтому допустимо использование информационного сопровождения в виде электронных образовательных ресурсов и интерактивных презентаций в процессе изучения курса по нанооптике.

В работе проведено подробное описание разработки электронного образовательного ресурса по нанооптике с помощью инструментов Share Point. Наиболее перспективным устройством наноплазмоники является спайзер. Поскольку спайзер работает в средней инфракрасной области спектра, он может быть полезным устройством для ряда приложений, таких как наноскопия, нанолитография, наноспектроскопия и полуклассическая обработка информации.

Список литературы

1. Алтунин К. К. Разработка и внедрение электронного курса по нанооптике // В книге: Актуальные проблемы физической и функциональной электроники материалы 19-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. 2016. С. 128-129.
2. Алтунин К. К. Разработка электронного образовательного ресурса в университете при помощи инструментов Google Site и MOODLE // Поволжский педагогический поиск. 2017. № 3 (21). С. 116-124.
3. Алтунин К. К. Исследование распространения поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела двух анизотропных нанокомпозитных сред, содержащих наночастицы серебра // Радиоэлектронная техника. 2017. № 1 (10). С. 146-152.
4. Алтунин К. К. Исследование распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела нанокомпозитных сред в теории гомогенизации с формулами Максвелл-Гарнетта, Бруггемана и Лорентц-Лоренца // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного

приборостроения. 2016. Т. 16. № 1. С. 71-74.

5. Алтунин К. К. Моделирование поверхностных плазмонных волн на границе нанокомпозитных сред с наночастицами серебра // Наноматериалы и наноструктуры - XXI век. 2014. Т. 5. № 4. С. 3-8.
6. Алтунин К. К. Распространение поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела двух нанокомпозитных сред, содержащих сферические наночастицы // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2017. Т. 17. № 1. С. 93-96.
7. Алтунин К. К., Хамзина Л. Ш. Разработка и внедрение электронного курса на примере темы "Наноплазмонные материалы" // В сборнике: Актуальные вопросы преподавания технических дисциплин Материалы Всероссийской заочной научно-практической конференции. 2016. С. 78-81.
8. Алтунин К. К., Юртаева Н. Д. Разработка и внедрение электронного курса по нанооптике на примере темы "Наноматериалы с квазинулевой проницаемостью" // В сборнике: Актуальные вопросы преподавания технических дисциплин Материалы Всероссийской заочной научно-практической конференции. 2016. С. 88-91.
9. Bergman D. J., Stockman M. I. Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation: Quantum Generation of Coherent Surface Plasmons in Nanosystems // Physical Review Letters. — 2003. — Jan. — Vol. 90, No. 2. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.90.027402.
10. Bordo V. G. Cooperative effects in spherical spasers: Ab initio analytical model // Physical Review B. — 2017. — Jun. — Vol. 95, No. 23. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.95.235412.
11. Bordo V. G. Self-excitation of surface plasmon polaritons // Physical Review B. — 2016. — Apr. — Vol. 93, No. 15. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.93.155421.
12. Channel spaser: Coherent excitation of one-dimensional plasmons from quantum dots located along a linear channel / A. A. Lisyansky [et al.] // Physical Review B. — 2011. — Oct. — Vol. 84, No. 15. — URL:

https://doi.org/10.1103/physrevb.84.153409.

13. Limitations of Particle-Based Spasers / G. Kewes [et al.] // Physical Review Letters. — 2017. — Jun. — Vol. 118, No. 23. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.118.237402.
14. Modeling the directed transmission and reflection enhancements of the lasing surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation in active metamaterials / Zh.-G. Dong [et al.] // Physical Review B. — 2009. — Dec. — Vol. 80, No. 23. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.80.235116.
15. Nonlocal surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation / Y. Huang [et al.] // Physical Review A. — 2014. — May. — Vol. 89, No. 5. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.89.053824.
16. Parfenyev V. M., Vergeles S. S. Intensity-dependent frequency shift in surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation // Physical Review A. — 2012. — Oct. — Vol. 86, No. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.86.043824.
17. Paudel H. P., Apalkov V., Stockman M. I. Three-dimensional topological insulator based nanospaser // Physical Review B. — 2016. — Apr. — Vol. 93, No. 15. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.93.155105.
18. Petrosyan L. S., Shahbazyan T. V. Spaser quenching by off-resonant plasmon modes // Physical Review B. — 2017. — Aug. — Vol. 96, No. 7. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.96.075423.
19. Stationary behavior of a chain of interacting spasers / E. S. Andrianov [et al.] // Physical Review B. — 2012. — Apr. — Vol. 85, No. 16. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.85.165419.
20. Surface plasmon amplification by stimulated emission in nanolenses / K. Li [et al.] // Physical Review B. — 2005. — Mar. — Vol. 71, No. 11. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.71.115409.