ISSN 2712-8326

НАУКА ONLINE
SCIENCE ONLINE

Электронный научный журнал
№ 3 (16) | 2021

http://nauka-online.ru/

НАУКА ONLINE, № 3 (16), 2021.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 75253 от 01.04.2019 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

ISSN 2712-8326

Выходит 4 раза в год.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Главный редактор: К. К. Алтунин.

Адрес редакции: Россия, 432071, г. Ульяновск, площадь Ленина, д. 4/5.

Официальный сайт: `http://nauka-online.ru/`

E-mail: nauka_online@ulspu.ru

Science online, issue 3 (16), 2021.

The certificate of registration of the mass media EL No. FS 77 – 75253 dated 01.04.2019 was issued by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communications, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor).

ISSN 2712-8326

Published 4 times a year.

Founder: Ulyanovsk State Ulyanov Pedagogical University.

Editor-in-chief: K. K. Altunin.

Editorial office address: Russia, 432071, Ulyanovsk, Lenin Square, 4/5.

Official site: `http://nauka-online.ru/`

E-mail: nauka_online@ulspu.ru

Редакционная коллегия

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

Артемьева Елена Александровна, доктор биологических наук, профессор кафедры географии и экологии ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Демин Максим Викторович, кандидат физико-математических наук, директор департамента по научной работе Балтийского федерального университета имени И. Канта, г. Калининград.

Идрисов Ринат Галимович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического моделирования Стерлитамакского филиала ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет».

Капитанчук Василий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева.

Медетов Нурлан Амирович, доктор физико-математических наук, декан факультета информационных технологий Костанайского государственного университета имени А. Байтурсынова, г. Костанай, республика Казахстан.

Пестова Наталия Юрьевна, кандидат химических наук, доцент кафедры биологии и химии ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Пырова Светлана Александровна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры биологии и химии ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Федоров Владимир Николаевич, кандидат географических наук, профессор, доцент кафедры географии и экологии ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Фёдорова Екатерина Александровна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры информатики ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Цыганов Андрей Владимирович, кандидат физико-математических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией математического моделирования, доцент кафедры высшей математики ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Червон Сергей Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Шишкарев Виктор Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Шубович Валерий Геннадьевич, доктор педагогических наук, кандидат технических наук, заведующий кафедрой информатики, профессор кафедры информатики ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Editorial team

Editor-in-Chief — Konstantin Konstantinovich Altunin, PhD, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Elena Aleksandrovna Artemyeva, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Geography and Ecology of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Maksim Viktorovich Demin, PhD, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Director of the Research Department, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

Rinat Galimovich Idrisov, PhD, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematical Modeling of the Sterlitamak branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bashkir State University".

Vasily Vyacheslavovich Kapitanchuk, PhD, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics of the Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after the Chief Marshal of Aviation B. P. Bugaev.

Nurlan Amirovich Medetov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Dean of the Faculty of Information Technologies, Kostanay State University named after A. Baitursynov, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Nataliya Yurievna Pestova, PhD, Candidate of Chemistry Science, Associate Professor of the Department of Biology and Chemistry of the Ulyanovsk State Pedagogical University.

Svetlana Aleksandrovna Pyrova, PhD, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Biology and Chemistry of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Vladimir Nikolaevich Fedorov, PhD, Candidate of Geographical Sciences, Professor, Associate Professor of the Department of Geography and Ecology of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Ekaterina Aleksandrovna Fedorova, PhD, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Andrey Vladimirovich Tsyganov, PhD, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Research Laboratory of Mathematical Modeling, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Sergey Viktorovich Chervon, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Viktor Vyacheslavovich Shishkarev, PhD, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Physics and Technical Disciplines of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Valeriy Gennadievich Shubovich, Doctor of Pedagogical Sciences, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Informatics, Professor of the Department of Informatics of Ulyanovsk State Pedagogical University.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Педагогические науки 1

Теория образования и преподавания физики 1

1 Педагогическое проектирование системы олимпиадных задач по оптике в школе
Т. В. Галоватюк

21 Проектирование элементов онлайн-курса по физике для седьмых классов общеобразовательной школы
А. А. Карташова

33 Исследование возможностей и перспектив совершенствования методологии и методики преподавания интерактивных технологий обучения физике в педагогическом университете
Е. Е. Волкова

Физико-математические науки 42

Оптика 42

42 Исследование оптического пропускания и отражения нанокомпозита с включениями из углеродных наноматериалов
К. К. Алтунин, Е. В. Торутанова

76 Исследование распространения поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита
К. К. Алтунин, Е. Н. Причалова

Современные информационные технологии в физике 115

115 Разработка дистанционного курса по факультативному курсу “Нанотехнологии в современном мире”
К. К. Алтунин

Авторский указатель 139

CONTENTS

Pedagogical sciences 1

Theory of education and teaching physics 1

1 Pedagogical design of the system of Olympiad problems in optics at school
T. V. Galovatyuk

21 Designing online course elements of an online physics course for the eighth grade of a comprehensive school
A. A. Kartashova

33 Investigation of the possibilities and prospects for improving the methodology and methods of teaching interactive technologies for teaching physics at the Pedagogical University
E. E. Volkova

Physics and mathematics 42

Optics 42

42 Investigation of optical transmission and reflection of a nanocomposite with inclusions from carbon nanomaterials
K. K. Altunin, E. V. Torutanova

76 Investigation of the propagation of a surface plasmon-polariton at the interface between a dielectric and a nanocomposite
K. K. Altunin, E. N. Prichalova

Modern information technologies in physics 115

115 Development of a distance course for the optional course “Nanotechnologies in the modern world”
K. K. Altunin

Author’s index 139

Секция 1

Педагогические науки

УДК 53.01
ББК 22.3
ГРНТИ 29.01.45
ВАК 13.00.02

Педагогическое проектирование системы олимпиадных задач по оптике в школе

Т. В. Галоватюк [1]

МБОУ г. Ульяновска «Средняя школы № 85», 432066, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 11 июня 2021 года
После переработки 16 июня 2021 года
Опубликована 9 сентября 2021 года

Аннотация. Рассмотрен процесс педагогического проектирования системы олимпиадных задач по оптике в общеобразовательной школе. Разработана система задач и заданий по оптике для подготовки к олимпиадам по физике учащихся одиннадцатых классов общеобразовательной школы. Проведён анализ различных задач олимпиадного типа по оптике. Описаны решения задач олимпиадного типа по оптике. Созданные методические материалы по олимпиадным задачам по оптике могут быть использованы в процессе создания новой методологии обучения методам решения олимпиадных задач в рамках очного бакалавриата и очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки физико-математического профиля в педагогическом университете, пополнении научной базы актуальными методическими материалами по обучению методам и способам решения олимпиадных задач по физике в старших классах общеобразовательной школы.

Ключевые слова: физика, физическое образование, задачи по физике, система подготовки учащихся, система задач по физике

PACS: 01.40.-d

[1] E-mail: nazarowa.tanja@yandex.ru

Введение

Одной из приоритетных задач современного образования по физике в старших классах общеобразовательной школы становится обучение и воспитание наиболее подготовленных учащихся по физике к участию к олимпиадах различных уровней. При этом важным оказывается не только развитие предметной подготовки учащихся по физике, но и выявление этой подготовки, ещё никак не проявившейся у обучающихся. В настоящее время существует большое количество олимпиад по физике и физико-математическим дисциплинам, поэтому становится актуальной создание системы подготовки школьников к олимпиадам по физике различного уровня.

Целью работы является исследование внедрение системы олимпиадных задач по оптике в общеобразовательной школе.

Объектом исследования является система олимпиадных задач по оптике в 11 классе общеобразовательной школы.

Предметом исследования является процесс обучения решению задач по оптике разного уровня и типа в 11 классе общеобразовательной школы.

Научная новизна работы заключается в совместном использовании традиционных и смешанных форм подготовки к олимпиадам по физике.

Гипотеза исследования состоит в том, что если использовать систему олимпиадных задач по оптике в систематически организованной подготовке в традиционной форме в сочетании с использованием информационных технологий, то можно создать эффективную систему подготовки к олимпиадам по физике в общеобразовательной школе.

В качестве методов исследования применяются методы решения олимпиадных задач по оптике в 11 классе общеобразовательной школы.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что созданные методические материалы по олимпиадным задачам по оптике могут быть использованы в процессе создания новой методологии обучения методам решения олимпиадных задач в рамках очного бакалавриата и очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки физико-математического профиля в педагогическом университете, пополнении научной базы актуальными методическими материалами по обучению методам и способам решения олимпиадных задач по физике в старших классах общеобразовательной школы.

Практическая значимость исследования заключается в выявлении характерных особенностей решений олимпиадных задач по оптике, которые могут быть использованы в рамках процессе преподавания методов решения олимпиадных задач в очном бакалавриате и очной магистратуре по педагогическому направлению подготовки физико-математического профиля в педагогическом университете.

Обзор работ по методике решения задач по физике в школе

Система нестандартных задач школьного курса физики по теме «Закон сохранения», расширяющая представления школьников о механических взаимодействиях, рассматривается в статье[1].

Вопрос об активизации работы студентов при проведении практических занятий по курсу общей физики рассматривается в работе [2]. Анализируется выбор задач, решение которых необходимо для закрепления раздела «законы сохранения в механике». Предлагается использовать задачи, извлеченные из трудов выдающихся исследователей: физиков и механиков. Приведена подборка таких задач и выявлены особенности задач, способствующие повышению интереса учащихся к учебе и улучшению их знаний.

В [3] рассматривается содержание понятия «задача» в педагогической науке. Обсуждается проблема видового разнообразия физических задач. На основе информационной

модели учебного процесса предложена классификация физических задач. Показано обновление видового состава задач в условиях информатизации системы образования. Выполнен анализ видового разнообразия учебных физических задач, представленных в школьных задачниках по физике и цифровых учебных ресурсах.

В [4] рассматриваются педагогические инновации с использованием компьютерных технологий в подготовке учителя.

В рамках реализации ФГОС ОО существенно возрастает роль внеурочной деятельности учащихся. В статье [5] анализируется проблема организации различных форм внеурочной работы по физике, выявляются основные направления совершенствования данной работы. Внеурочная деятельность по физике, в том числе, и в каникулярный период, содержит в себе мощный потенциал. Она не только популяризирует образование, но и осуществляет важные функции: способствует развитию способностей, личностных качеств, формированию интеллектуального потенциала обучаемых; помогая ориентироваться в шкале жизненных ценностей, направлена на выработку целевой установки на высокий результат, адекватное отношение к окружающему миру. При этом необходимо учитывать, что работа в данном направлении должна быть целенаправленной, последовательной и систематичной.

В статье [6] представлены основные характеристики обобщённых проектных умений, отмечена необходимость формирования обобщённых проектных умений современных выпускников инженерного вуза в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования. Обосновано применение решения задач с целью формирования указанных умений. Представленные этапы выполнения проектов соотнесены с ходом решения задач. Отмечено сходство учебной деятельности при решении задач и выполнении проектов. В статье [6] представлена модель организации образовательного процесса с целью формирования обобщённых проектных умений, содержащая целевой, методический и дидактический блоки. В представленной модели последовательно отражены содержание, методы и средства формирования обобщённых проектных умений студентов инженерного вуза. Отмечены виды деятельности преподавателя и студентов с целью формирования обобщённых проектных умений.

Усвоение теоретического материала по физике осуществляется полнее и прочнее в процессе решения задач, так как в ходе разрешения задачных ситуаций те или иные теоретические знания становятся насущной необходимостью. При этом раскрывается с разных сторон практическая значимость физических знаний, и устанавливаются границы применимости физических теорий. В этой связи, главная цель, поставленная в данной работе, состоит в том, чтобы как можно полнее показать пути использования и способы применения на практике теоретического материала из разделов физики.

Методические особенности построения системы задач по физике рассматривались в работах [7–9].

В [10] обосновывается необходимость приведения в систему знаний по физике, полученных абитуриентами в средней школе. Обобщаются универсальные принципы, позволяющие учащимся выработать полезные навыки в решении задач по физике. Утверждается особая роль математических средств в формировании таких навыков. Обсуждается первостепенное значение корректных формулировок физических законов и разумного выбора абстрактной модели. Подчеркивается эффективность системного подхода к решению физических задач и анализу смысла полученного результата.

Для многих учащихся целью изучения физики в школе, помимо получения базовых представлений о фундаментальных законах природы, является использование полученных знаний и умения решать задачи при дальнейшем обучении в вузе. Это умение необходимо также при сдаче единого государственного экзамена для успешного поступления в вузы, предусматривающие дальнейшее изучение физики и специальных дисциплин и

курсов, связанных с ней тесным образом.

Решение задач по физике — необходимый элемент учебной работы. Задачи дают материал для упражнений, требующих применения физических закономерностей к явлениям, протекающим в тех или иных конкретных условиях. Поэтому они имеют большое значение для конкретизации знаний учащихся, для привития или умения видеть различные конкретные проявления общих законов. Без такой конкретизации знания остаются книжными, не имеющими практической ценности. Решение задач способствует более глубокому и прочному условию физических законов, развитию логического мышления, сообразительности, инициативы, воли к настойчивости в достижения поставленной цели, вызывает интерес к физике, помогает навыков самостоятельной работы и служит незаменимым средством для развития самостоятельности суждения. Решение задач — это один из методов познания взаимосвязи законов природы.

Решение задач — неотъемлемая часть процесса изучения основ физической науки, поскольку позволяет формировать и обогащать физические понятия, применять положения теории при рассмотрении конкретных ситуаций. В процессе решения задач вырабатываются такие черты характера, как любознательность, самостоятельность в суждениях, развивается логическое мышление, приобретаются навыки моделирования реальных объектов и явлений.

Решение задач на уроке иногда позволяет ввести новые понятия и формулы, выяснить изучаемые закономерности, подойти к изложению нового материала. Содержание физических задач расширяет круг знаний учащихся о явлениях природы и техники. В процессе решения задач ученики непосредственно сталкиваются с необходимостью применить полученные знания по физике в жизни, глубже осознают связь теории с практикой. Решение задач — одно из важных средств повторения, закрепления и проверки знаний учащихся.

Часто при решении задачи учащиеся выписывают чуть ли не все формулы, относящиеся к рассматриваемому в задаче явлению, чтобы затем попытаться их соединить для получения ответа. Такое «решение» нецелесообразно, тем более что даже если ответ получен верный, смысл хода решения ускользает, уверенности в правильности его нет, остаётся неприятное чувство неудовлетворенности. При таком подходе отсутствует логика, стройность и завершённость решения.

Особое место в процессе обучения физике занимает обучение решению физических задач. Процесс обучения решению физических задач подводит школьников к последнему этапу формирования физических знаний, установлению причинно-следственных связей, усвоению логических операций, применению математических операций на самом высоком – прикладном – уровне. Обучение школьников решению физических задач должно осуществляться на технологическом уровне, с опорой на соответствующую педагогическую технологию.

С технологической точки зрения процесс решения задачи представляет последовательность реализации пяти этапов: идентификация физического явления; актуализация теоретических сведений; моделирование решения задачи; выполнение расчётов; интерпретация и проверка полученных результатов.

На каждом этапе решения физической задачи возможно использование компьютера. Однако сразу же возникает вопрос целесообразности. Очевидно, что для разных образовательных уровней при обучении школьников решению физических задач ответ на этот вопрос должен быть разным, а иногда и прямо противоположным. Например, в основной школе, в 7 классе на начальном этапе, когда школьники только знакомятся с новым образовательным явлением — физической задачей, использование компьютера вообще нежелательно. В противном случае у ученика может не сформироваться адекватное представление о физической задаче, правилах её оформления и решения, о

требованиях, предъявляемых к ученику в процессе решения задачи [11].

На следующих этапах, уровень физического материала усложняется, физические явления перестают быть очевидными (как при изучении поступательного движения) и возникает необходимость выполнения сложных многоступенчатых математических расчётов, за которыми не всегда виден физический смысл (например, при нахождении корней квадратного уравнения). В этом случае использование компьютера является жизненной необходимостью. С одной стороны, это позволяет сэкономить много драгоценного учебного времени для сосредоточения на основной предметной функции, с другой стороны, и это более важно – усилить акценты в решении задачи на выяснении физического смысла ситуации, в целом, и интерпретации полученных результатов, в частности.

В условиях информационной среды решение сложных физических задач, как и весь процесс обучения, уже немыслимы без компьютера. Существуют разные уровни использования компьютера при решении физических задач. Первый уровень — тривиальный – предполагает применение компьютера только как средства расчета (уровень калькулятора). На этом уровне с помощью компьютера (калькулятора) выполняют трудоемкие, но элементарные математические преобразования и вычисления [11].

Второй уровень — пользовательский – предусматривает использование компьютера на других более сложных этапах решения задачи – «идентификации» и «моделирования». Для этого выясняют все существенные стороны физической ситуации, описанной в задаче, и затем, в зависимости от потребностей, строится описывающая физический процесс модель разной степени общности – от рисунка до графика или математического уравнения [11].

Третий уровень — продвинутый – позволяет не только идентифицировать явления, моделировать и выполнять решение, но и интерпретировать полученные результаты. Такой подход позволяет получать результаты, настолько глубоко раскрывающие физику явления, что становятся очевидными даже сведения, выходящие за рамки условия задачи. В этом случае можно говорить о реализации особой функции — изучении при решении задачи ранее недоступных элементов физики явлений. На каждом уровне может применяться программирование [11].

Большое значение для приобщения учащихся к физической науке имеет понимание ими места физической науки в системе общечеловеческих ценностей; понимание необходимости разумного использования достижений физической науки и технологий для дальнейшего развития человеческого общества; опыт морально-этической оценки использования научных достижений; понимание собственной ответственности за защиту окружающей среды, то есть ценностно-смысловые компетенции. Формирование этого вида ключевых компетенций связано не с самим научным знанием (физическими явлениями и законами, методами научного познания природы, физическими теориями и пр.), а этическими и правовыми нормами, прагматическими и эстетическими оценками, которые физика, как элемент общечеловеческой культуры включает наряду со строго научным содержанием. При этом природное явление представляется не просто как набор объективных знаний о его причинах и следствиях, о закономерностях и связях с другими явлениями, а как элемент целостной системы общечеловеческих ценностей, поддерживающих органическую соразмерность человека и природы, общества и науки.

Для того чтобы изучение курса физики оказывало реальное влияние на ценностно-смысловые компетенции учащихся, необходимы деятельностно-ориентированные технологии. При этом наибольшим потенциалом среди традиционных технологий обучения физике обладают физические задачи.

Ценностно-смысловыми задачами могут быть традиционные качественные, расчётные, графические и экспериментальные задачи по физике на оперирование научны-

ми знаниями, в ходе выполнения которых становится ясной их научная ценность, или включающие учащихся в ситуацию выбора. При их решении происходит ценностно-смысловое усвоение законов природы, накопление опыта эмоционально-оценочной деятельности и выработка собственных критических суждений.

В статье [12] обоснована необходимость усиления внимания к подбору и решению графических задач в практике обучения физике в старших классах средней школы. Впервые предложена классификация школьных учебных графических задач по различным основаниям.

В статье [13] представлена модель процесса формирования учебных компетенций обучающихся при решении задач по физике в основной общеобразовательной школе. Анализируются теоретические подходы к созданию модели, а также рассматриваются её структурные элементы: цель, содержание, методические подходы, педагогические условия, методы и формы организации занятий. Описан механизм формирования учебных компетенций, с учётом последовательной реализации совокупности учебных ситуаций: представление ситуации, осмысление ситуации, личная рефлексия, переосмысление ситуации, изменение отношения к ситуации, изменение мотивов деятельности и освоение новых мотивов деятельности. Определены основные компоненты учебных компетенций: теоретический, диагностический, процессуальный, результативно-оценочный, личностный и коммуникационный. Перечислены виды и предложена классификация учебных компетентностно-ориентированных задач в соответствии с их направленностью на формирование компонентов учебных компетенций. Определены критерии формирования учебных компетенций, предложены формы контроля и уровни сформированности учебных компетенций (начальный, средний, высокий). В статье [13] приведены показатели уровней сформированности учебных компетенций в соответствии с выделенными критериями.

В статье [14] рассматривается педагогическая технология, позволяющая решать задачи формирования метапредметных, предметных и личностных результатов учащихся в процессе обучения физике. Определяется соотношение метапредметных и предметных знаний, их взаимосвязь, выстраиваются логические связи между понятиями физики. Для формирования таких уровней усвоения знаний, как узнавание, понимание, воспроизведение учащиеся обучаются индуктивному и дедуктивному анализу незнакомой учебной информации по физике. Предлагаемая технология обучения позволяет выполнить дедуктивный и индуктивный анализ большого объема научной информации за несколько минут. Это даёт возможность уже на первом уроке изучения темы сформировать необходимые уровни усвоения учебной информации, познакомить учащихся с терминологией темы, установить взаимосвязи между понятиями, воспроизвести основную информацию по теме, на изучение которой отводиться несколько десятков часов. У учащихся формируется общее представление о теме, даётся её структура, классификации, выстраиваются связи: объект исследования — средства описания. Анализ незнакомой информации по физике необходим для обучения учащихся самостоятельному планированию учебной деятельности. Данная педагогическая технология позволяет оптимально и эффективно организовать мыслительную деятельность учащихся и студентов, сформировать систему метапредметных и предметных знаний, сформировать познавательную самостоятельность студентов и школьников.

В [15] рассматриваются причины углубления разрыва между школьной физикой и передовым краем науки. Предлагается в качестве метода преодоления этого разрыва проводить с одарёнными школьниками проектные и исследовательские работы. Проведение проектных и исследовательских работ позволяет в определённой мере построить мосты между ограниченными возможностями школьного курса физики и достижениями современной науки и техники.

В работе [16] рассматривается комплексный проблемно-ориентированный подход к решению задач по физике с системным использованием информационных компьютерных технологий. Предлагаемая методика расширяет проблемное поле обучения физике, приближает его содержание к современному уровню научных знаний, позволяет использовать в учебном процессе методологию физики как науки, ориентирует учащихся не только на освоение системы предметных знаний, но и на развитие творчества. Метод может быть применим как при подготовке студентов по специальности «учитель физики», так и в профильной школе.

В статье [17] рассматриваются основные подходы к процессу реализации внутрипредметных связей при решении задач разного типа по физике. В соответствии с вариантами реализации внутрипредметных связей школьного курса физики задачи могут быть разделены на следующие типы: тривиальные, традиционные, качественные, графические, экспериментальные, олимпиадные и исследовательские. Показано, что для качественного формирования у школьников системы знаний должны быть использованы задачи разных типов: тривиальные и традиционные задачи для выделения связей между физическими понятиями и сопряжения их в физических законах; качественные, экспериментальные и графические задачи позволяют протянуть связь от физических явлений к их моделям; олимпиадные и исследовательские задачи могут служить для построения максимально разветвленной структуры внутрипредметных связей. Также отмечено, что задачи тривиального и традиционного типов представляются оптимальными для использования при диагностике эффективности подходов к реализации внутрипредметных связей.

Одним из самых эффективных методов реализации внутрипредметных связей является решение задач. Но при решении задач разного типа процесс реализации может затрагивать как различные по типу внутрипредметные связи, так и различные по объему группы связей. Процесс решения задачи по физике может быть представлен как переход от исходных данных (информации, предоставляемой условием задачи) к результату (конечным данным) путем использования некоторого набора методов (моделирования, анализа, математических методов и т.д.), отражающих физические законы. Собственно процесс реализации внутрипредметных связей при решении задач условно можно разбить на два шага. Сначала, анализируя содержащиеся в условии задачи данные, необходимо восстановить максимально возможное количество связей между ними. Следующим шагом на основе уже выявленных связей определяются наиболее перспективные, а иногда и просто доминирующие связи, выстраиваемые в логическую цепочку, которая приводит к результату, к решению задачи.

Общие методические вопросы решения задач по физике рассматривались в работах [18–24]. Креативные методы и эвристические приёмы решения сложных и нестандартных задач по физике рассматривались в работах [25–30]. Методическому аспекту формирования умений решения задач, развитию логического, предметно-специфического мышления учащихся всегда уделялось серьезное внимание в научных педагогических исследованиях (по физике, прежде всего, следует отметить работы А. В. Усовой [31], Н. Н. Тулькибаевой, А. А. Боброва, Б. Ф. Абросимова, В. К. Кобушкина, С. Е. Коменецкой, В. П. Орехова [18, 20], О. Ф. Кабардина, В. А. Орлова, И. Л. Касаткиной, Г. А. Дзида, Ю. А. Саурова и др.). В работе [31] была предложена структура учебной деятельности по решению физических задач. Разветвлённая система из разноуровневых задач по физике приводится в [32]. Например, методические аспекты системы задач по физике рассматривалась в работе [7]. Компьютерная интерактивная система решения задач по физике рассматривалась в работе [33]. Общие вопросы педагогики в методике преподавания были рассмотрены в [34–37]. Результаты разработки системы олимпиадных задач по физике были описаны в работах [38, 39].

Элементы системы олимпиадных задач по оптике

Задачи, обычно предлагаемые для решения при обучении физике в школе, можно условно разделить на группы по содержанию (качественные задачи, расчетные, графические и экспериментальные) и по уровню сложности (тривиальные, среднего уровня сложности и олимпиадные). Поскольку достаточно большой объем физических задач носит характер расчетных и соответствует среднему уровню сложности, то задачи данного типа мы будем называть «традиционными».

Система олимпиадных задач по физике направлена на практическую реализацию одной из приоритетных задач современного школьного образования по физике, которая становится ключевым элементом в процессе обучения физике. При этом важным оказывается не только последовательная реализация стандартных методов углубленной подготовки по физике, но и развитие олимпиадной подготовки учащихся по физике, необходимой не только для успешного поступления в ведущие вузы, но и успешного обучения в вузах и становления будущего специалиста в области физики. Значение работы с одарёнными учащимися трудно переоценить в связи с характерными особенностями в социально-экономическом развитии страны в настоящее время, приводящими к острой необходимости подготовки специалистов самого высокого уровня в области физики.

При создании системы задач по физике из задач, связанных между собой и имеющих несколько уровней сложности, проводят всесторонний анализ учебного материала по физике в рамках выбранных разделов и тем, устанавливают соответствие темам, производят отбор содержания, производят выбор методов и методических приёмов для составления и отбора задач, выполняют техническое создание системы задач по физике в соответствии с предъявляемыми требованиями к уровню олимпиадных заданий.

В самостоятельной части работы разработана система олимпиадных задач по оптике для 11 класса. Произведён подбор и анализ олимпиадных задач по оптике по программе Всероссийской олимпиады школьников по физике для 11 класса. Выполним анализ олимпиадных задач по оптике в одиннадцатом классе общеобразовательной школы.

Задача 1. Очень толстая линза

Теоретик Баг выбрал для исследования прозрачную пластину с показателем преломления n, ограниченную двумя сферическими поверхностями с радиусами кривизны R и $r < R$.

1. Какой должна быть толщина пластины L, чтобы падающий на поверхность с радиусом кривизны R параксиальный пучок света преобразовывался в параллельный?

2. Во сколько раз увеличивается интенсивность пучка света (энергия, переносимая за единицу времени через единицу площади) после прохождения через пластину?

3. Какое угловое увеличение для удалённых предметов даёт пластина? Потерями энергии пучка внутри пластины можно пренебречь.

Решение.

Рассмотрим сначала вспомогательную задачу о падении параллельного пучка на сферическую поверхность радиуса R, отделяющую среду с показателем преломления от воздуха. Рассмотрим два луча, падающие на поверхность раздела под малыми углами. Пусть луч DOF (рис. 1) проходит через центр шара.

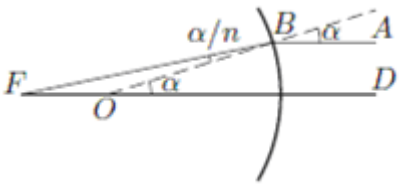


Рис. 1. Два луча, падающие на поверхность раздела под малыми углами.

Другой луч ABF, преломляется в точке B на границе раздела сред, падая на неё под углом α. Тогда $\angle OBF = \alpha/n$ как угол преломления, $\angle BOD = \alpha$; из $\triangle BOF$ находим, что $\angle BFO = \alpha - \alpha/n$. Применим к $\triangle BOF$ теорему синусов и учтём, что синус малого угла приближённо равен самому углу в радианах:

$$\frac{\alpha/n}{|OF|} \approx \frac{\alpha\,(1-1/n)}{|BO|} \approx \frac{\alpha}{|BF|}\,. \tag{1}$$

Отсюда $|BF| = |BO|\,/\,(1-1/n) = Rn/\,(n-1)$. Таким образом, узкий параллельный пучок лучей после преломления на сферической поверхности раздела сред сходится в фокусе, находящемся от поверхности раздела на расстоянии $Rn/\,(n-1)$ на луче, проходящем через центр.

Аналогичным образом получаем, что при падении на вогнутую сферическую поверхность раздела сред (радиус R) параллельный пучок света преобразуется в расходящийся, продолжения лучей пересекаются на расстоянии $Rn/\,(n-1)$ от поверхности.

1. Перейдём теперь к ответам на вопросы задачи. Параллельный пучок света будет преобразован оптической системой в параллельный, если фокусы двух сферических поверхностей совпадают. В условии не сказано, выпуклыми или вогнутыми являются поверхности раздела. Поэтому следует рассмотреть все возможные случаи.

Если предположить, что поверхность большего радиуса вогнутая, то получаемый после преломления на ней расходящийся пучок может быть преобразован в параллельный только путём преломления на поверхности радиуса $r > R$, что противоречит условию задачи. Напротив, поверхность радиуса r может быть как выпуклой, так и вогнутой (рис. 2).

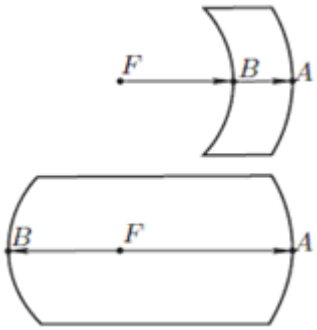


Рис. 2. Поверхность радиуса r.

В обоих случаях $|AF| = Rn/\,(n-1)$, $|BF| = rn/\,(n-1)$. Следовательно, в первом случае $\ell = |AB| = (R-r)\,n/\,(n-1)$, во втором случае $\ell = |AB| = (R+r)\,n/\,(n-1)$.

2. При прохождении через пластинку пучок света сжимается в R/r раз, следовательно, его интенсивность возрастает в $(R/r)^2$ раз.

3. Найдем угловое увеличение, даваемое пластинкой. Для этого рассмотрим вспомогательную задачу: определим, под каким углом γ к оси симметрии (рис. 3) должен падать параллельный пучок света, чтобы после преломления на сферической поверхности радиуса R сойтись в точке F' на расстоянии y от фокуса F в фокальной плоскости.

Из симметрии относительно поворота вытекает, что

$$\gamma = \frac{y}{|OF|} = \frac{y\,(n-1)}{R}\,. \tag{2}$$

Следовательно, падающий на сферическую поверхность под углом γ параллельный пучок света после преломления сходится в точку в фокальной плоскости, находящуюся на расстоянии $\gamma R/\,(n-1)$ от фокуса F.

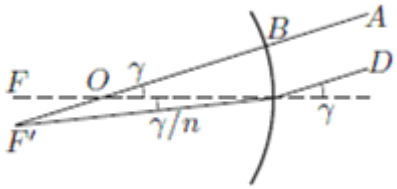


Рис. 3. Падение пучка света на сферическую поверхность радиуса R.

Таким образом, пучок, падающий на пластинку под углом γ_1 к оси симметрии параллельно ей, выходит из пластинки под углом γ_2, определяемым из соотношения

$$\frac{\gamma_1 R}{n-1} = \frac{\gamma_2 r}{n-1}\,. \tag{3}$$

Отсюда находим угловое увеличение: $\gamma_1/\gamma_1 = r/R$.

Задача 2. Пара неодинаковых линз

Экспериментатор Глюк расположил две тонкие линзы L_1 и L_2 с фокусными расстояниями F_1 и F_2 на расстоянии L друг от друга. Тонкую линзу L_3 располагают между линзами L_1 и L_2 таким образом, что любой луч, падающий на оптическую систему под малым углом к главной оптической оси, выходит из неё параллельно своему первоначальному направлению. Найдите фокусное расстояние F_3 линзы L_3 и расстояния ℓ_1 и ℓ_2 от линзы L_3 до линз L_1 и L_2. Главные оптические оси всех трёх линз совпадают.

Примечание: Фокусные расстояния собирающих линз принимаются положительными, рассеивающих – отрицательными.

Решение.

Тонкие линзы L_1 и L_2 переводят параллельные пучки лучей в пучки, проходящие через точки и соответственно (рис. 4).

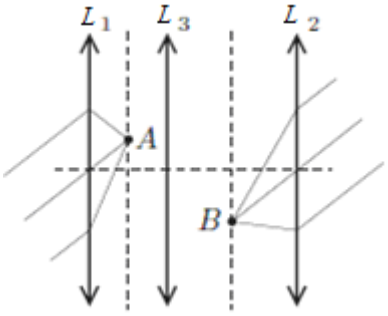


Рис. 4. Система тонких линз.

Следовательно, линза L_3 должна переводить пучок лучей, проходящий через точку A, в пучок лучей, проходящий через точку B. Поскольку луч AB не преломляется, он проходит через центр линзы O_3; отсюда однозначно восстанавливается плоскость линзы, перпендикулярная главной оптической оси системы. Фокусное расстояние линзы L_3 определяется по формуле тонкой линзы.

Для получения количественного ответа введём систему координат: в качестве начала координат выберем центр линзы L_1, направим ось Ox вдоль главной оптической оси, ось Oy перпендикулярно оси Ox таким образом, чтобы лучи из параллельного пучка распространялись параллельно плоскости Oxy. Обозначим малый угол наклона параллельного пучка лучей к главной оптической оси через α.

Точки A и B имеют координаты $A(F_1, F_1\alpha)$, $B\,(L, -F_2, -F_2\alpha)$. Центр O_3 линзы L_3,

имеющий координаты $O_3\,(\ell_1, 0)$, лежит на прямой AB; отсюда

$$\frac{\ell_1 - F_1}{-F_1\alpha} = \frac{L - \ell_1 - F_2}{-F_2\alpha}\,. \tag{4}$$

$$\ell_1 = \frac{LF_2^{-1}}{F_1^{-1} + F_2^{-1}} = \frac{LF_1}{F_1 + F_2}\,, \tag{5}$$

$$\ell_2 = \frac{\ell F_2}{F_1 + F_2}\,. \tag{6}$$

При этом должны выполняться соотношения $0 < \ell_1 < L$, $0 < \ell_2 < L$, поскольку линза L_3 по условию лежит между линзами L_1 и L_2. Следовательно, задача может иметь решение, только если обе линзы (L_1 и L_2) собирающие либо рассеивающие; если одна из линз собирающая, другая рассеивающая, задача решения не имеет.

Для нахождения фокусного расстояния F_3 линзы L_3 запишем формулу тонкой линзы:

$$\frac{1}{\ell_1 - F_1} + \frac{1}{\ell_2 - F_2} = \frac{1}{F_3}\,. \tag{7}$$

$$F_3 = \frac{F_1F_2\,(\ell_1 - F_1 - F_2)}{(F_1 + F_2)^2}\,. \tag{8}$$

При $L = F_1 + F_2$ задача решения не имеет.

Задача 3. Плоский световод

Вблизи левого торца хорошо отполированной прозрачной пластины, показатель преломления которой n, расположен точечный источник света S (рис. 5). Толщина пластины $H = 1\,$см, её длина $L = 100\,$см. Свет от источника падает на левый торец пластины под всевозможными углами падения (0 – $90°$). В глаз наблюдателя попадают как прямые лучи от источника, так и лучи, многократно испытавшие полное отражение на боковых гранях пластины.

1. Какое максимальное число отражений может испытать луч от источника, выходящий через правый торец пластины? Решите задачу для двух значений коэффициента преломления: $n_1 = 1.73$, $n_2 = 1.3$.

2. Укажите, в каком из этих двух случаев свет частично выходит из пластины через боковые грани.

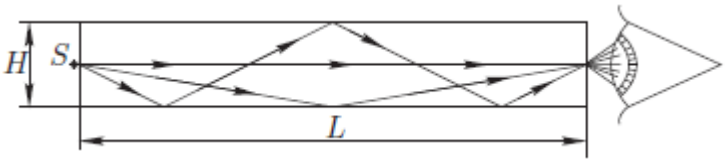


Рис. 5. Плоский световод.

Решение.

Рассмотрим преломление лучей от источника на левом торце пластинки (рис. 6).

Максимальный угол β_{max} преломления на левом торце соответствует углу падения $\alpha = 90°$:

$$\sin\beta_{max} = \frac{1}{n}\,. \tag{9}$$

Минимальный угол падения на боковую грань

$$\varphi_{min} = 90° - \beta_{max}\,. \tag{10}$$

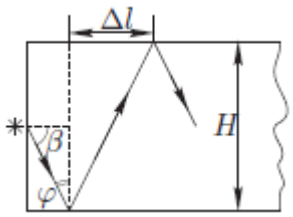


Рис. 6. Ход луча в плоском световоде.

Ход лучей в пластине будет зависеть от соотношения между φ_{min} и φ_{lim} (предельный угол полного отражения).

Случай 1. $\varphi_{min} \geq \varphi_{lim}$, или $\varphi_{min} \geq \sin\varphi_{lim} = \frac{1}{n}$.

В этом случае все лучи, падающие на боковые грани пластины, будут испытывать полное отражение и, следовательно, ни один луч не выйдет из пластины.

$$\sin\varphi_{min} = \cos\beta_{max} = \frac{\sqrt{n^2-1}}{n} \geq \frac{1}{n}\,, \tag{11}$$

следовательно

$$\sqrt{n^2-1} \geq 1\,, \tag{12}$$

откуда следует $n \geq \sqrt{2}$.

Минимальное расстояние $(\Delta\ell)$ между соседними отражениями лучей на противоположных гранях:

$$(\Delta\ell)_{min} = H\,\mathrm{tg}\,\varphi_{min} = H\frac{\cos\beta_{max}}{\sin\beta_{max}} = H\frac{1/n\sqrt{n^2-1}}{1/n} = H\sqrt{n^2-1}\,. \tag{13}$$

Максимальное число отражений $N_1 = (N_1)_{max}$:

$$N_1 = \frac{L}{(\Delta\ell)_{min}} + \frac{1}{2} = \frac{L}{H}\frac{1}{\sqrt{n^2-1}} + \frac{1}{2}\,. \tag{14}$$

Слагаемое $1/2$ возникает из-за того, что перед первым отражением луч проходит вдоль трубы расстояние $\Delta\ell/2$.

При $n = n_1 = 1.73$ $N_1 = 71$.

Случай 2. $\varphi_{min} \leq \varphi_{lim}$ или $\sin\varphi_{lim} \geq \sin\varphi_{lim} = \frac{1}{n}$; $\frac{1}{n}\sqrt{n^2-1} \leq \frac{1}{n}$.

В этом случае

$$(\Delta\ell)_{min} = H\,\mathrm{tg}\,\varphi_{lim} = \frac{H}{\sqrt{n^2-1}}\,. \tag{15}$$

Часть лучей, падающих на боковую грань под углами от φ_{min} до φ_{lim}, будут испытывать только частичное отражение и не дойдут до правого торца пластины.

Максимальное число отражений $N_2 = (N_2)_{max}$:

$$N_2 = \frac{L}{(\Delta\ell)_{min}} + \frac{1}{2} = \frac{L}{H}\sqrt{n^2-1} + \frac{1}{2}\,, \tag{16}$$

при $n = n_2 = 1.3$, $N_2 = 100 \cdot 0.83 = 83$.

Система олимпиадных задач по оптике направлена на практическую реализацию одной из приоритетных задач современного школьного образования по физике, заключающуюся в качественной подготовке по физике.

Заключение

В процессе выполнения работы была создана система олимпиадных задач по оптике, направленная на практическую реализацию одной из приоритетных задач современного школьного образования по физике, заключающуюся в качественной подготовке учащихся одиннадцатых классов общеобразовательной школы к олимпиадам по физике.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если использовать систему олимпиадных задач по оптике в систематически организованной подготовке в традиционной форме в сочетании с использованием информационных технологий, то можно создать эффективную систему подготовки к олимпиадам по физике в общеобразовательной школе, подтверждена полностью.

В рамках теоретической части работы была разработана система олимпиадных задач по физике для одиннадцатого класса. Разработанная система задач по оптике на практике показала хорошие результаты при подготовке учащихся к олимпиадам по физике. Это факт служит следствием того, что разработанная система задач по оптике для одиннадцатого класса способствует развитию мышления учащихся, их подготовке к участию в олимпиадах и творческих поисках; воспитывает трудолюбие, настойчивость, волю, целеустремлённость и является хорошим средством контроля над знаниями, умениями и навыками. Разработанная система олимпиадных задач по физике позволяет проводить эффективную подготовку к решению олимпиадных задач по физике. Подготовка в традиционной форме, которая организована систематически и планомерно, в сочетании с использованием информационных технологий позволяет организовать эффективную подготовку одарённых учащихся к олимпиадам по физике. Систематическая подготовка по физике, организованная в традиционной форме, в сочетании с использованием информационных компьютерных технологий при изучении оптики позволяет организовать эффективную подготовку к олимпиадам по физике.

Список использованных источников

1. Зульфикарова Т. В., Матвеева Л. И. Нестандартные задачи по теме «Законы сохранения» // В сборнике: Современные технологии преподавания естественнонаучных дисциплин в системе общего и профессионального образования сборник материалов Международного научно-практического форума. — Борисоглебский филиал ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», 2016. — С. 94–97.

2. Комнатный Д. В. Учебно-исследовательские задачи для закрепления темы «Законы сохранения в механике» курса общей физики // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. — 2013. — Т. 2, № 2 (8). — С. 93–98.

3. Оспенников А. А., Оспенников Н. А. Виды задач по физике и их разнообразие в традиционных и цифровых учебных пособиях по предмету // Вестник Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета. Серия: Информационные компьютерные технологии в образовании. — 2010. — № 6. — С. 79–89.

4. Трофимова Е. И. Педагогические инновации в подготовке учителя // Высшее образование в России. — 2004. — № 6. — С. 52–59.

5. Краснова Л. А., Нугманова А. С. Особенности внеурочной работы по физике в условиях реализации ФГОС ОО // В сборнике: Проблемы и перспективы информатизации физико-математического образования. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. — 2016. — С. 319–322.

6. Пак В. В., Мельникова Т. Н., Сотириади Г. Н. Использование учебных задач по физике с целью формирования обобщённых проектных умений // Современные наукоемкие технологии. — 2016. — № 6-1. — С. 174–178.

7. Кокин В. А. Система задач по физике // Вестник Поволжской государственной социально-гуманитарной академии. — 2012. — № 7. — С. 272–278.

8. Кокин В. А., Макаров И. Необходимость применения системы качественных и экспериментальных задач по физике в профильной школе // В сборнике: Формирование учебных умений Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ульяновский государственный педагогический университет им. И.Н. Ульянова. — 2009. — С. 129–129.

9. Кокин В. А. Система задач во внеклассной работе по развитию познавательного интереса и творческих способностей учащихся школы (на примере кружка) // В сборнике: Естественно-научное образование. Прошлое, настоящее, будущее. Материалы Всероссийской заочной интернет-конференции. — 2011. — С. 176–178.

10. Федоренко И. В. Принципы решения физических задач // Экономические и социально-гуманитарные исследования. — 2017. — № 2 (14). — С. 81–86.

11. Машиньян А. А., Кочергина Н. В. Технологии обучения решению физических задач в условиях современной информационной среды // Мир науки, культуры, образования. — 2017. — № 5 (66). — С. 167–171.

12. Бутырский Г. А. Классификация графических задач по физике и проблемы обучения их решению // Вестник Вятского государственного гуманитарного университета. — 2010. — Т. 3, № 1. — С. 141–146.

13. Сулейманян Е. А. Модель формирования учебных компетенций при решении задач по физике // Ярославский педагогический вестник. — Т. 2, № 1. — С. 138–145.

14. Путина Н. Д. Индуктивный и дедуктивный анализ учебной информации по физике как средство реализации стандарта общего среднего образования // Ярославский педагогический вестник. — 2015. — Т. 2, № 2. — С. 39–44.

15. Рыжиков С. Б. Пути преодоления пропасти между «меловой физикой» и современной наукой // Наука и современность. — 2012. — № 15-3. — С. 92–94.

16. Зеличенко В. М., Ларионов В. В. О проблемно-ориентированном подходе к решению задач по физике в профильной школе и вузе // Вестник Томского государственного педагогического университета. — 2009. — № 5. — С. 10–15.

17. Сторчилов П. А. О проблеме реализации внутрипредметных связей при решении задач по физике // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 2. — С. 471–479.

18. Каменецкий С. Е., Орехов В. П. Методика решения задач по физике в средней школе. Пособие для учителей. — Москва : Просвещение, 1971. — 448 с.

19. Каменецкий С. Е., Солодухин Н. А. Модели и аналогии в курсе средней школы: пособие для учителей. — Москва : Просвещение, 1982. — 96 с.

20. Орехов В. П., Усова А. В. Методика преподавания физики в 8-10 классах средней школы. Часть 2. — Москва : Просвещение, 1980. — 350 с.

21. Резников Л. И., Шамаш С. Я., Эвенчик Э. Е. Методика преподавания физики в средней школе : механика : пособие для учителей. — Москва : Просвещение, 1974. — 238 с.

22. Шаповалов А. А. Размышления при решении физических задач. — Барнаул : Издательство БГПУ, 2001. — 150 с.

23. Разумовский В. Г., Браверман Э. М. Урок физики в современной школе (творческий поиск учителя). — Москва : Просвещение, 1993. — 288 с.

24. Елизаров К. Н. Вопросы методики преподавания физики в средней школе : пособие для учителей. — Москва : Учпедгиз, 1962. — 240 с.

25. Абросимов Б. Ф. Способы и методы поиска решения задач: учебно-методическое пособие. — Москва : Экзамен, 2006. — 287 с.

26. Дегтярев С. Н. Креативные методы и эвристические приёмы решения физических задач. — Тюмень : ТОГИРРО, 2009. — 28 с.

27. Красин М. С. Решение сложных и нестандартных задач по физике. Эвристические приёмы поиска решений. — Москва : ИЛЕКСА, 2008. — 360 с.

28. Красин М. С. Система эвристических приёмов решения задач по физике. Теория, методика, примеры: учебно-методическое пособие. — Калуга : Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, 2009. — 147 с. — ISBN: 978-5-88725-176-9.

29. Ильясов И. И. Система эвристических приёмов решения задач. — Москва : Издательство Российского открытого университета, 1992. — 138 с.

30. Козырева Н. А. Педагогическое сопровождение одарённых детей // Успехи современного естествознания. — 2004. — № 5. — С. 55–58.

31. Усова А. В., Бобров А. А. Формирование учебных умений и навыков учащихся на уроках физики. — Москва : Просвещение, 1988. — 111 с.

32. Балаш В. А. Задачи по физике и методы их решения. — Москва : Просвещение, 1983. — 434 с.

33. Лазарев А. Н., Кузько А. Е., Дремов Е. Н. Компьютерная интерактивная система решения задач по физике // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Лингвистика и педагогика. — 2013. — № 1. — С. 114–121.

34. Бордовская Н. В. Педагогика. — СПб. : Питер, 2000. — 401 с.

35. Латынина Д. Н. История педагогики. Воспитание и образование в России. — Москва : Издательский дом «Форум», 2008. — 315 с.

36. Сластенин В. А. Педагогика. — Москва : Школа-Пресс, 2009. — 512 с.

37. Харламов И. Ф. Педагогика. — Москва : Высшая школа, 2000. — 356 с.

38. Алтунин К. К., Лушникова Ю. О., Назарова Т. В. Электронный курс по олимпиадным задачам по физике // В сборнике: Актуальные вопросы преподавания технических дисциплин. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. — 2018. — С. 6–8.

39. Алтунин К. К., Лушникова Ю. О., Назарова Т. В. Электронный курс по олимпиадным задачам по физике // Наука online. — 2018. — № 2 (3). — С. 53–69.

Сведения об авторах:

Татьяна Валерьевна Галоватюк — учитель физики и математики МБОУ г. Ульяновска «Средняя школы № 85», 432066, Ульяновск, Россия.

E-mail: nazarowa.tanja@yandex.ru

ORCID iD 0000-0003-4222-067X

Web of Science ResearcherID AAZ-8100-2020

Pedagogical design of the system of Olympiad problems in optics at school

T. V. Galovatyuk

MBOU Ulyanovsk "Secondary School No. 85", 432066 Ulyanovsk, Russia,

Submitted June 11, 2021
Resubmitted June 16, 2021
Published September 9, 2021

Abstract. The process of pedagogical design of the system of Olympiad problems in optics in a comprehensive school is considered. A system of tasks and assignments in optics has been developed to prepare students of the eleventh grade of a comprehensive school for physics olympiads. The analysis of various problems of the Olympiad type in optics has been carried out. Solutions of Olympiad-type problems in optics are described. The created methodological materials on olympiad problems in optics can be used in the process of creating a new methodology for teaching methods for solving olympiad problems within the framework of full-time bachelor's and full-time master's programs in the pedagogical direction of preparing a physical and mathematical profile at a pedagogical university, replenishing the scientific base with relevant methodological materials on teaching methods and ways of solving Olympiad problems in physics in the senior classes of a comprehensive school.

Keywords: physics, physical education, problems in physics, student training system, physics problem system

PACS: 01.40.-d

References

1. Zulfikarova T. V., Matveeva L. I. Non-standard tasks on the topic ¡¡Conservation laws¿¿ // In the collection: Modern technologies for teaching natural sciences in the system of general and professional education, collection of materials of the International Scientific and Practical Forum. — Borisoglebsk Branch of FSBEI HE "Voronezh State University", 2016. — P. 94–97.

2. Room D. B. Educational and research tasks to consolidate the topic "Conservation laws in mechanics" of the course of general physics // Emergencies: education and science. — 2013. — Vol. 2, no. 2(8). — P. 93–98.

3. Ospennikov A. A., Ospennikov N. A. Types of problems in physics and their variety in traditional and digital textbooks in the subject // Bulletin of the Perm State Humanitarian and Pedagogical University. Series: Information and computer technologies in education. — 2010. — no. 6. — P. 79–89.

4. Trofimova E. I. Pedagogical Innovation in Teacher Training // Higher education in Russia. — 2004. — no. 6. — P. 52–59.

5. Krasnova L. A., Nugmanova A. S. Features of extracurricular work in physics in the context of the implementation of GEF OO // In the proceedings: Problems and prospects of informatization of physical and mathematical education. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. — 2016. — P. 319–322.

6. Pak V. V., Melnikova T. N., Sotiriadi G. N. Use of learning tasks in physics in order to form generalized design skills // Modern high technologies. — 2016. — no. 6-1. — P. 174–178.

7. Kokin V. A. System of problems in physics // Bulletin of the Volga State Social and Humanitarian Academy. — 2012. — no. 7. — P. 272–278.

8. Mashinyan A. A., Kochergina N. V. Technologies for teaching solving physical problems in a modern information environment // World of science, culture, education. — 2017. — no. 5 (66). — P. 167–171.

9. Ryzhikov C. B. Ways to bridge the gap between ¡¡chalk physics¿¿ and modern science // Science and modernity. — 2012. — no. 15-3. — P. 92–94.

10. Storchilov P. A. On the problem of implementing intra-subject communications when solving problems in physics // Modern problems of science and education. — 2015. — no. 2. — P. 471–479.

11. Butyrsky G. A. Classification of graphic problems in physics and problems of learning to solve them // Bulletin of the Vyatka State University for the Humanities. — 2010. — Vol. 3, no. 1. — P. 141–146.

12. Putin N. D. Inductive and deductive analysis of educational information in physics as a means of implementing the standard of general secondary education // Yaroslavl Pedagogical Bulletin. — 2015. — Vol. 2, no. 2. — P. 39–44.

13. Suleimanyan E. A. Model for the formation of educational competencies in solving problems in physics // Yaroslavl Pedagogical Bulletin. — Vol. 2, no. 1. — P. 138–145.

14. Kokin V. A., Makarov I. The need to apply a system of qualitative and experimental problems in physics in a specialized school // In the collection: Formation of educational skills Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Ulyanovsk State Pedagogical University. I.N. Ulyanova. — 2009. — P. 129–129.

15. Kokin V. A. The system of tasks in extracurricular activities to develop the cognitive interest and creativity of school students (on the example of a circle) // In the proceedings: Science education. Past present Future. Materials of the All-Russian Correspondence Internet Conference. — 2011. — P. 176–178.

16. Fedorenko I. V. Principles for solving physical problems // Economic and social-humanitarian research. — 2017. — no. 2(14). — P. 81–86.

17. Zelichenko V. M., Larionov V. V. About a problem-oriented approach to solving problems in physics at a specialized school and university // Bulletin of the Tomsk State Pedagogical University. — 2009. — no. 5. — P. 10–15.

18. Kamenetsky S. E., Orekhov V. P. Methodology for solving problems in physics in high school. Teacher's Guide. — Moscow : Education, 1971. — 448 p.

19. Kamenetsky S. E., Solodukhin N. A. Models and Analogies in High School Course: A Manual for Teachers. — Moscow : Education, 1982. — 96 p.

20. Usova A. V., Bobrov A. A. Formation of educational abilities and skills of students in physics lessons. — Moscow : Education, 1988. — 111 p.

21. Orekhov V. P., Usova A. V. Methods of teaching physics in grades 8-10 of secondary school. Part 2. — Moscow : Education, 1980. — 350 p.

22. Reznikov L. I., Shamash S. Ya., Evenchik E. E. Methods of teaching physics in high school: mechanics: a manual for teachers. — Moscow : Education, 1974. — 238 p.

23. Shapovalov A. A. Reflections when solving physics problems. — Barnaul : BSPU Publishing House, 2001. — 150 p.

24. Razumovsky V. G., Braverman E. M. A physics lesson in a modern school (creative search for a teacher). — Moscow : Education, 1993. — 288 p.

25. Elizarov K. N. Questions of methods of teaching physics in secondary school: a guide for teachers. — Moscow, publisher = Uchpedgiz, year = 1962, numpages = 240, language = english.

26. Abrosimov B. F. Methods and methods of finding solutions to problems: teaching aid. — Moscow : Exam, 2006. — 287 p.

27. Degtyarev S. N. Creative Methods and Heuristic Techniques for Solving Physics Problems. — Tyumen : TOGIRRO, 2009. — 28 p.

28. Krasin M. S. Solution of complex and non-standard problems in physics. Heuristic techniques for finding solutions. — Moscow : ILEXA, 2008. — 360 p.

29. Krasin M. S. System of heuristic methods for solving problems in physics. Theory, methodology, examples: study guide. — Kaluga : Kaluga State University named after K. E. Tsiolkovsky, 2009. — 147 p.

30. Ilyasov I. I. A system of heuristic methods for solving problems. — Moscow : Publishing House of the Russian Open University, 1992. — 138 p.

31. Kozyreva N. A. Pedagogical support for gifted children // Achievements of modern natural science. — 2004. — no. 5. — P. 55–58.

32. Bordovskaya N. V. Pedagogy. — Saint Petersburg : Peter, 2000. — 401 p.

33. Latynina D. N. History of Pedagogy. Upbringing and education in Russia. — Moscow : Publishing house “Forum”, 2008. — 315 p.

34. Slastenin V. A. Pedagogy. — Moscow : School-Press, 2009. — 512 p.

35. Kharlamov I. F. Pedagogy. — Moscow : High School, 2000. — 356 p.

36. Balash V. A. Problems in physics and methods of solving them. — Moscow : Education, 1983. — 434 p.

37. Lazarev A. N., Kuzko A. E., Dremov E. N. Computer interactive system for solving problems in physics // Bulletin of the Southwestern State University. Series: Linguistics and Pedagogy. — 2013. — no. 1. — P. 114–121.

38. Altunin K. K., Lushnikova Yu. O., Nazarova T. V. Electronic course on Olympiad problems in physics // In the proceedings: Topical issues of teaching technical disciplines. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. — 2018. — P. 6–8.

39. Altunin K. K., Lushnikova Yu. O., Nazarova T. V. Electronic course on Olympiad problems in physics // Science online: electronic scientific journal. — 2018. — no. 2 (3). — P. 53–69.

Information about authors:

Tatiana Valerievna Galovatyuk — teacher of physics and mathematics at MBOU Ulyanovsk "Secondary School No. 85", 432066, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: nazarowa.tanja@yandex.ru

ORCID iD 0000-0003-4222-067X

Web of Science ResearcherID AAZ-8100-2020

УДК 53.02
ББК 22.3
ГРНТИ 29.01.45
ВАК 01.04.01

Проектирование элементов онлайн-курса по физике для седьмых классов общеобразовательной школы

А. А. Карташова [1]

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

Поступила в редакцию 1 июня 2021 года
После переработки 18 июня 2021 года
Опубликована 9 сентября 2021 года

Аннотация. Рассмотрен процесс создания онлайн-курса по физике для седьмых классов общеобразовательной школы при помощи инструментария Google Classroom. Приведено описание некоторых элементов онлайн-курса по физике в рамках тем по механическим и тепловым явлениям, взаимодействию тел, работе, мощности, энергии, давлению твёрдых тел, газов, жидкостей для седьмых классов общеобразовательной школы. Элементы онлайн-курса по физике в рамках тем по механическим и тепловым явлениям, взаимодействию тел, работе, мощности, энергии, давлению твёрдых тел, газов, жидкостей включают материалы с теоретическими сведениями по разделам физики седьмого класса общеобразовательной школы и материалы для контроля знаний в виде задач, контрольных вопросов, контрольных опросов и контрольных работ. Для элементов контроля знаний в виде задач, контрольных вопросов и контрольных работ можно устанавливать сроки сдачи работ в соответствии с тематическим планированием курса физики для седьмого класса общеобразовательной школы. С помощью онлайн-курса по физике в седьмых классах общеобразовательной школы можно реализовать процесс обеспечения непрерывной информационной поддержки процесса изучения физики в седьмых классах общеобразовательной школы.

Ключевые слова: физика, механические явления, взаимодействие тел, тепловые явления, работа, мощность, энергия, давление, дистанционный курс, онлайн-курс, смешанная технология обучения, общеобразовательная школа, контроль знаний

PACS: 01.40.E-

Введение

В настоящее время широкое применение получили различные информационные и компьютерные системы дистанционного обучения, которые применяются в современном образовательном процессе при использовании технологии смешанного обучения физике. Наличие даже некоторых элементов смешанного обучения позволяет легче контролировать процесс изучения физики и автоматизировать некоторые этапы проверки выполнения заданий по физике.

[1] E-mail: alesya_alekseevna@inbox.ru

В настоящей работе рассматриваются теоретические и методические проблемы разработки онлайн-курса по физике в седьмых классах общеобразовательной школы.

Актуальность разработки онлайн-курса по физике в седьмых классах общеобразовательной школы заключается в необходимости обеспечения непрерывной информационной поддержки изучения физики в седьмых классах общеобразовательной школы.

Цель исследования заключается в теоретическом обосновании, разработке, совершенствовании и реализации онлайн-курса по физике для седьмых классов общеобразовательной школы.

Задачи исследования:

1. написать обзор литературы по онлайн-курсам и электронным образовательным ресурсам по физике,
2. разработать структуру и элементы онлайн-курса по физике для седьмых классов в общеобразовательной школе для использования при обучении по смешанной технологии обучения физике.

Объектом исследования является процесс разработки онлайн-курса по физике для седьмых классов в общеобразовательной школе.

Предметом исследования являются теоретические и контролирующие материалы онлайн-курса по физике для седьмых классов в общеобразовательной школе.

Гипотеза исследования представляет собой предположение о том, что если разработать онлайн-курс по физике для седьмых классов в общеобразовательной школе, основанный на дидактически обработанной связи элементов курса, позволяющей организовать процесс творческого применения учащимися знаний по физике, то можно реализовать сбалансированную систему подготовки с использованием технологии смешанного обучения физике в седьмых классах в общеобразовательной школы.

Практическая значимость разработки онлайн-курса по физике в седьмых классах общеобразовательной школы заключается в возможности непрерывно функционирующей системы информационной поддержки изучения и контроля знаний по курсу физики в седьмых классах общеобразовательной школы.

Методологическую основу исследования составили исследовательский, проектирующий, аналоговый, аддитивный, системный, ситуационный, информационный подходы, на основе которых были проведены анализ предмета данного исследования и синтез подготовки по физике с использованием онлайн-курса в общеобразовательной школе.

Научная новизна исследования:

1. Обоснована необходимость создания онлайн-курса по физике для седьмых классов в общеобразовательной школе, позволяющий оптимально сочетать учебно-деятельностные, компетентностные и знаниевые компоненты изучения физики.
2. На методологическом и организационно-процессуальном уровнях предложено новое решение проблемы повышения эффективности системы подготовки по физике в общеобразовательной школе и эффективного обучения физике.
3. Разработан онлайн-курс по физике для седьмых классов в общеобразовательной школе, базирующийся на системно-деятельностном подходе изучения физики. Основные элементы онлайн-курса по физике для седьмых классов в общеобразовательной школе направлены на создание и реализацию условий, способствующих формированию у обучаемых творческого подхода к изучению физики, качественного освоения теоретической информации по физике, её критического анализа, поиска нестандартных подходов к решению сложных физических задач.

В качестве **методов научного исследования** используются анализ научной и психолого-педагогической литературы по теме исследования, синтез теоретических и

контролирующих материалов по физике для седьмых классов общеобразовательной школы, описание результатов разработки структуры и элементов онлайн-курса по физике для седьмых классов в общеобразовательной школе.

Обзор научных работ по электронным образовательным ресурсам по физике

В работе [1] обобщён практический опыт создания и использования в обучении физике электронных дидактических разработок с возможностью реализации дифференцированного подхода по модулю, связанного с изучением волновой оптики. Структура модуля из ядра и оболочки позволяет варьировать степень насыщения содержания информацией и уровень сложности учебного материала.

В работе [2] рассмотрены возможности организации самостоятельной работы студентов с использованием модульной объектно-ориентированной динамической учебной среды MOODLE как в рамках отдельных дисциплин, так и в междисциплинарном аспекте. В [2] предложен информационно-проектный метод обучения, реализуемый в модульной объектно-ориентированной динамической учебной среде MOODLE, позволяющий обеспечить междисциплинарное взаимодействие и профессиональную направленность при организации самостоятельной работы студентов. В работе [3] обоснована актуальность проблемы овладения студентами методами самостоятельной познавательной деятельности по физике средствами современных информационных технологий, в частности, на базе модульной объектно-ориентированной динамической учебной среды MOODLE.

В статье [4] описан результат разработки электронного образовательного ресурса в университете при помощи инструментария Google Site и модульной объектно-ориентированной динамической учебной среды MOODLE, а также проведено сравнение возможностей платформы Google Site и системы управления обучением MOODLE для создания онлайн-курсов по физике. Результат внедрения дистанционного курса по нанооптике, предназначенного для студентов педагогического университета, обучающихся по профилю подготовки, связанным с физикой и математикой, описан в работе [5]. Исследование информационных образовательных сред и электронных образовательных ресурсов по физике на примере темы по изучения явления фотоэффекта, созданных с использованием инструментов Google Sites, проведено в статье [6].

Проведённый анализ особенностей использования онлайн-курсов и электронных образовательных ресурсов по физике показал актуальность создания онлайн-курса.

Результаты разработки онлайн-курса по физике

При помощи инструментария Google Classroom разработан онлайн-курс по физике, предназначенный для учащихся седьмых классов общеобразовательной школы. В седьмом классе по физике изучаются роль физики в познании окружающего мира в объёме 4 часа, взаимодействие тел в объёме 24 часа, давление твёрдых тел, газов, жидкостей в объёме 22 часа, работа, мощность, энергия в объёме 14 часов. В курсе физики седьмого класса происходит знакомство с физическими явлениями, методом научного познания, формирование основных физических понятий, приобретение умений измерять физические величины, проводить лабораторный эксперимент по заданной схеме.

На рис. 1 представлено изображение главной страницы онлайн-курса по физике для седьмого класса общеобразовательной школы, созданного при помощи инструментария Google Classroom. Главная страница онлайн-курса по физике для седьмого класса общеобразовательной школы содержит название курса, названия основных тематических разделов курса по физике для седьмого класса общеобразовательной школы, код для доступа к курсу, перечень предстоящих событий, ленту курса и меню курса.

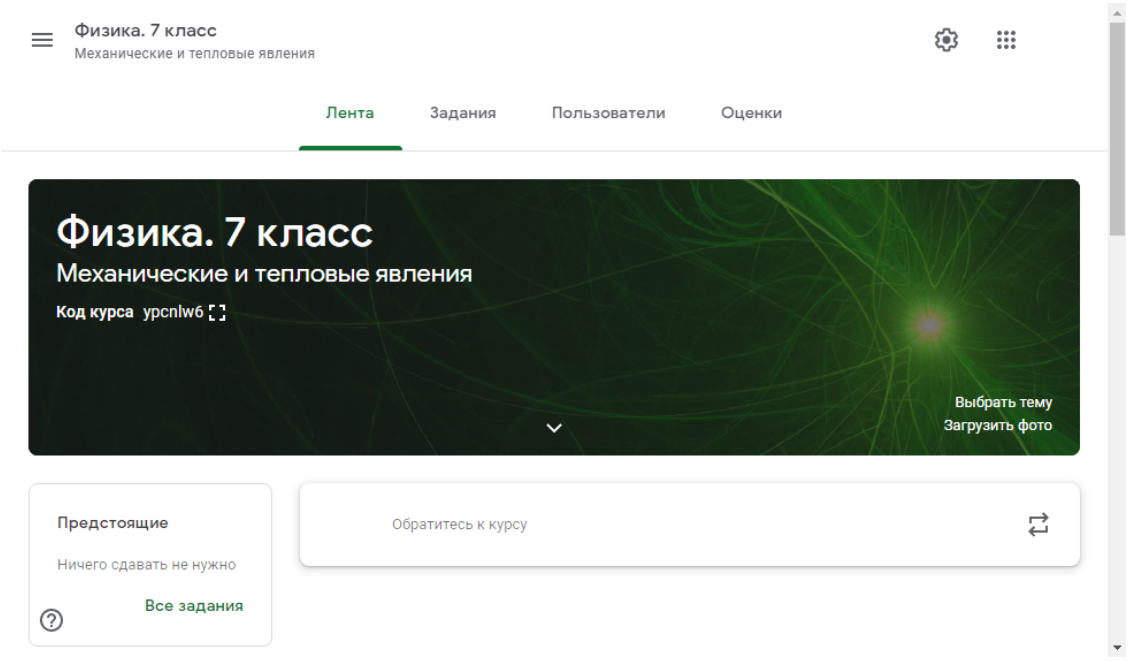


Рис. 1. Главная страница онлайн-курса по физике для седьмого класса общеобразовательной школы, созданного при помощи инструментария Google Classroom.

Школьники могут самостоятельно записываться на курс по физике для седьмого класса общеобразовательной школы, используя код для доступа к курсу. Используя меню курса можно перейти к заданиям курса по физике для седьмого класса, посмотреть список пользователей курса, посмотреть оценки пользователей курса за выполненные задания по физике.

На рис. 2 представлено изображение части перечня материалов и заданий темы по физическим методам изучения природы и взаимодействию тел в курсе физики для седьмого класса общеобразовательной школы, которые созданы при помощи инструментария Google Classroom.

На рис. 3 представлено изображение части перечня материалов и заданий темы по физическим методам изучения природы в курсе физики для седьмого класса общеобразовательной школы, созданном при помощи инструментария Google Classroom. Задания связаны с изучением механических явлений, взаимодействия тел, работы, мощности, энергии, тепловых явлений. Дистанционный контроль знаний по физике в рамках тем, связанных с изучением механических явлений, взаимодействия тел, работы, мощности, энергии, тепловых явлений, осуществляется при помощи заданий с задачами и лабораторными работами. Выполнение заданий допускает комментирование ответов и коллективное обсуждение ответов на некоторые задания.

На рис. 4 представлено изображение части перечня материалов и заданий темы по взаимодействию тел, строению и свойствам вещества в курсе физики для седьмого класса общеобразовательной школы, созданном при помощи инструментария Google Classroom. Разработаны теоретические и контролирующие материалы по взаимодействию тел, строению и свойствам вещества.

На рис. 5 представлено изображение слайда презентации по кинематическому описанию механических явлений в курсе физики для седьмого класса общеобразовательной школы, созданном при помощи инструментария Google Classroom.

На рис. 6 представлено изображение слайда презентации по динамическому описанию механических явлений в курсе физики для седьмого класса общеобразовательной школы, созданном при помощи инструментария Google Classroom.

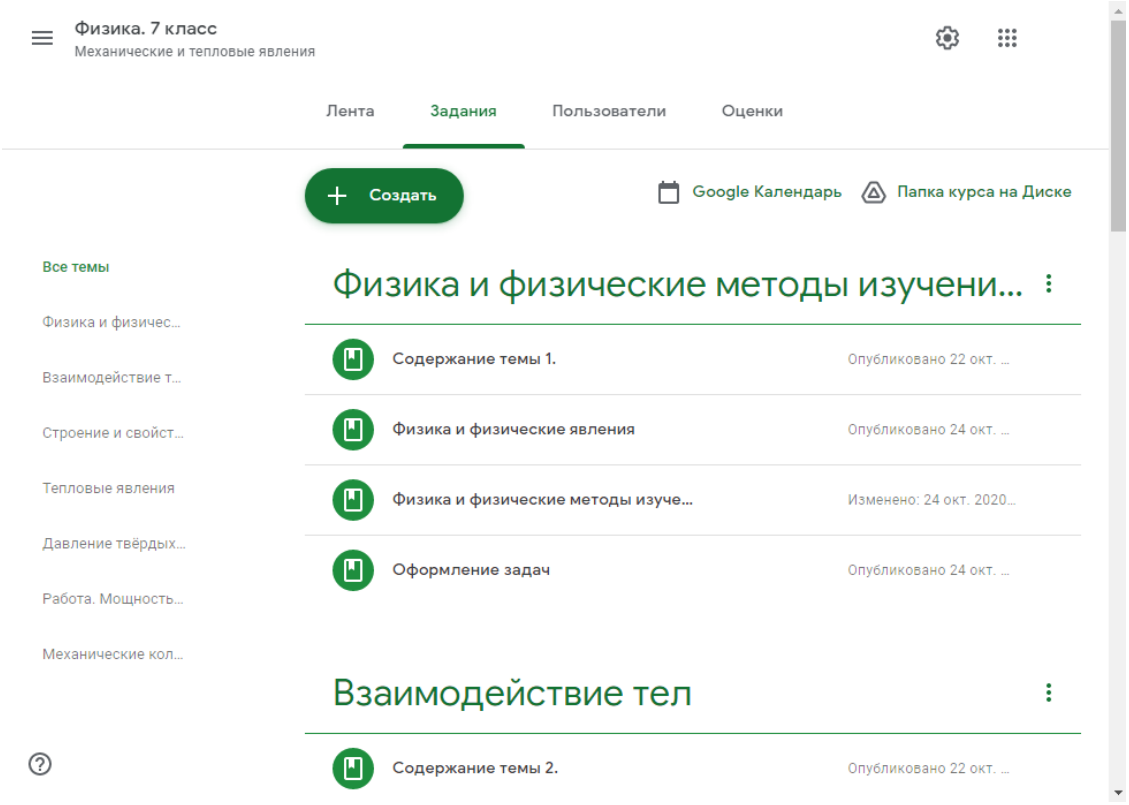


Рис. 2. Изображение части перечня материалов и заданий темы по физическим методам изучения природы и взаимодействию тел в курсе физики для седьмого класса общеобразовательной школы, созданный при помощи инструментария Google Classroom.

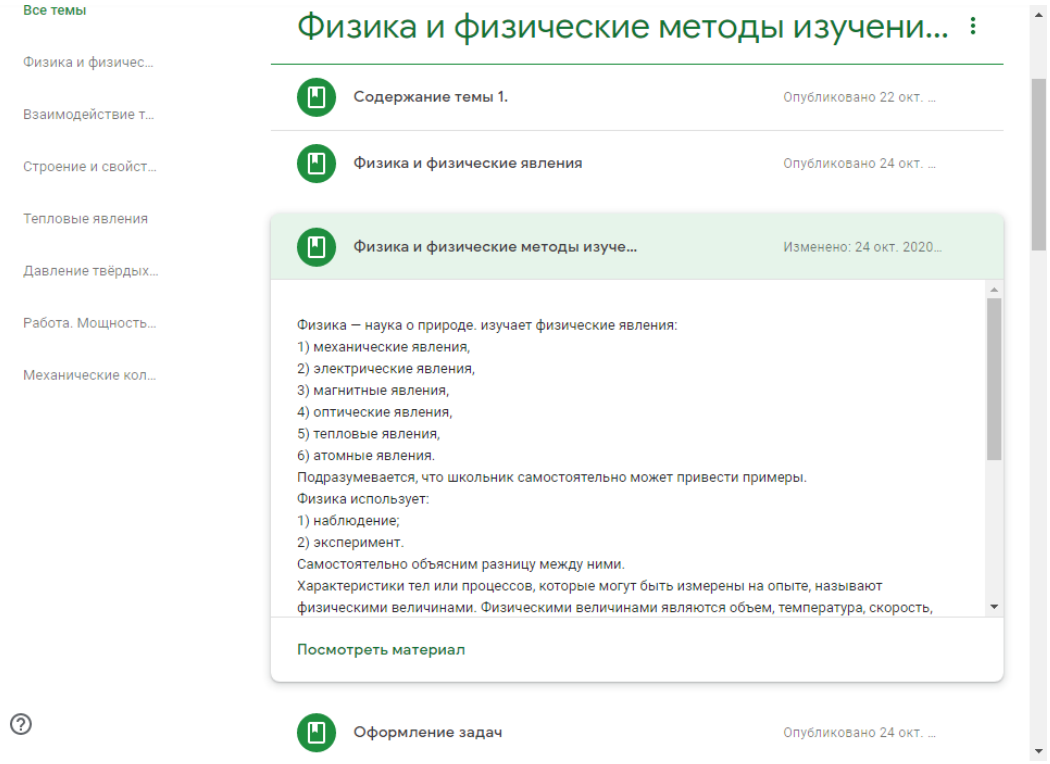


Рис. 3. Часть перечня материалов и заданий темы по физическим методам изучения природы в курсе физики для седьмого класса общеобразовательной школы, созданном при помощи инструментария Google Classroom.

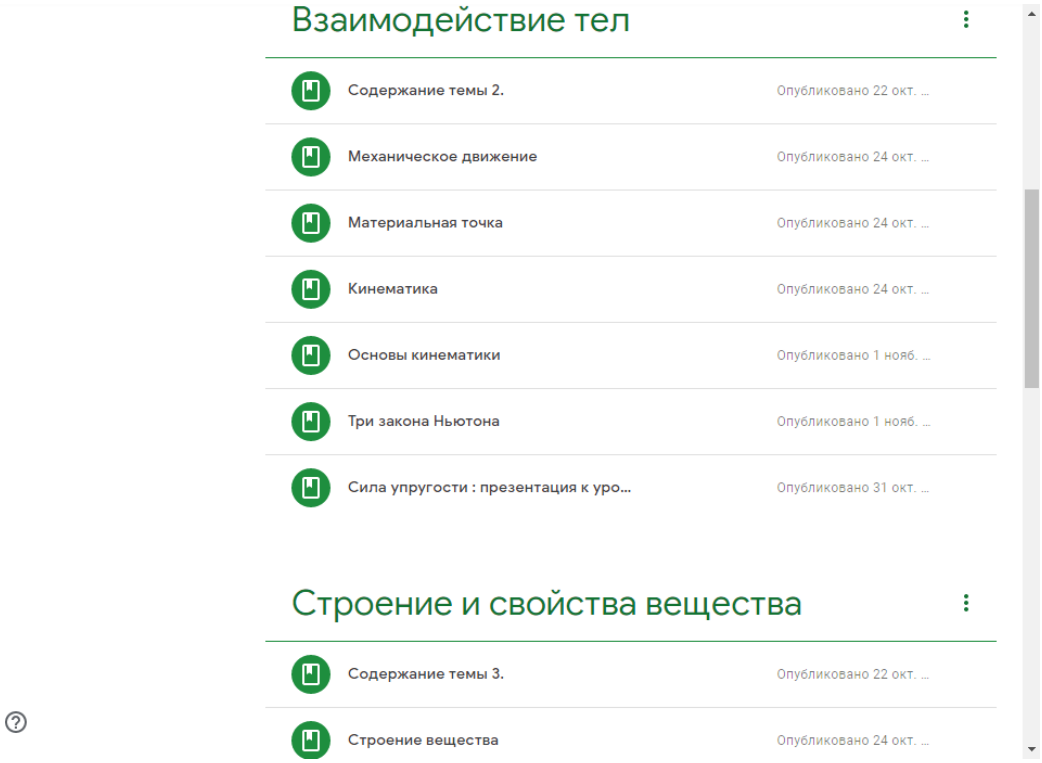


Рис. 4. Часть перечня материалов и заданий темы по взаимодействию тел, строению и свойствам вещества в курсе физики для седьмого класса общеобразовательной школы, созданном при помощи инструментария Google Classroom.

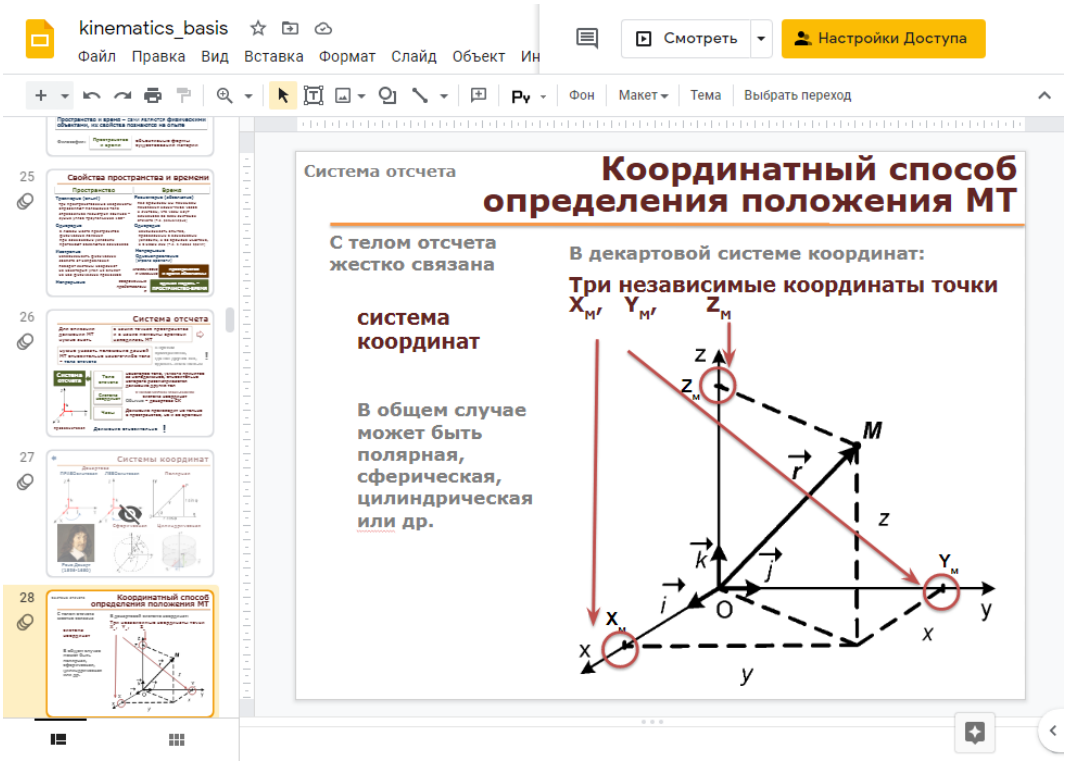


Рис. 5. Слайд презентации по кинематическому описанию механических явлений в курсе физики для седьмого класса общеобразовательной школы, созданном при помощи инструментария Google Classroom.

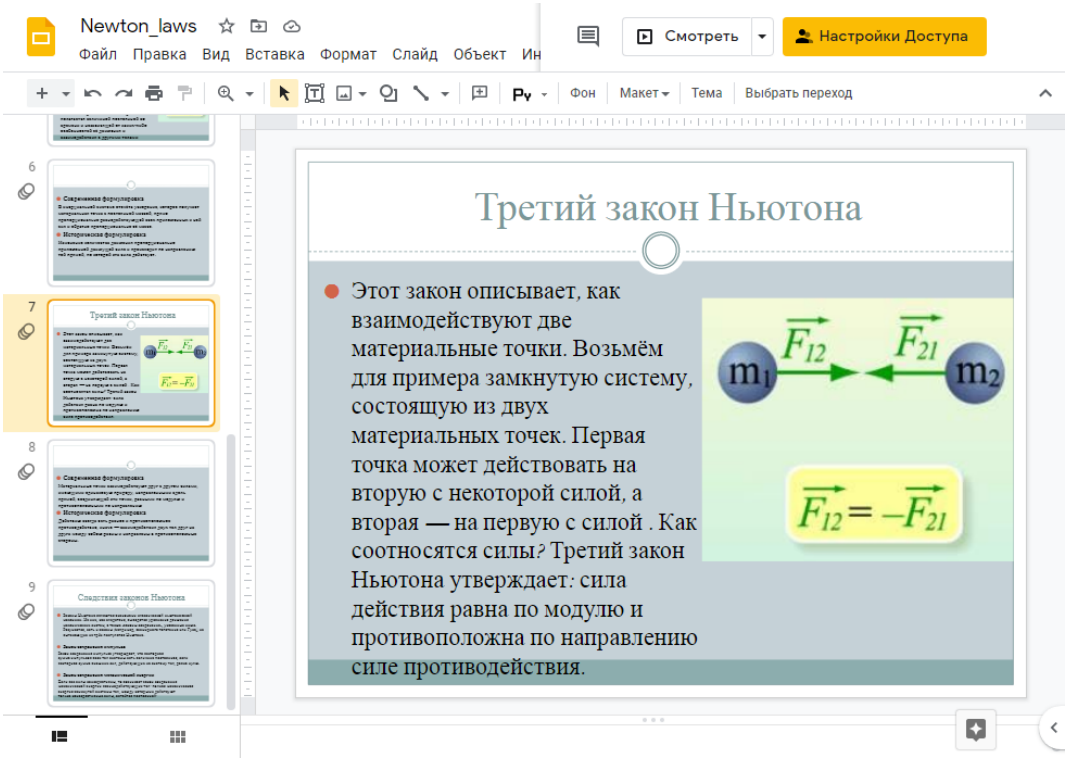


Рис. 6. Слайд презентации по динамическому описанию механических явлений в курсе физики для седьмого класса общеобразовательной школы, созданном при помощи инструментария Google Classroom.

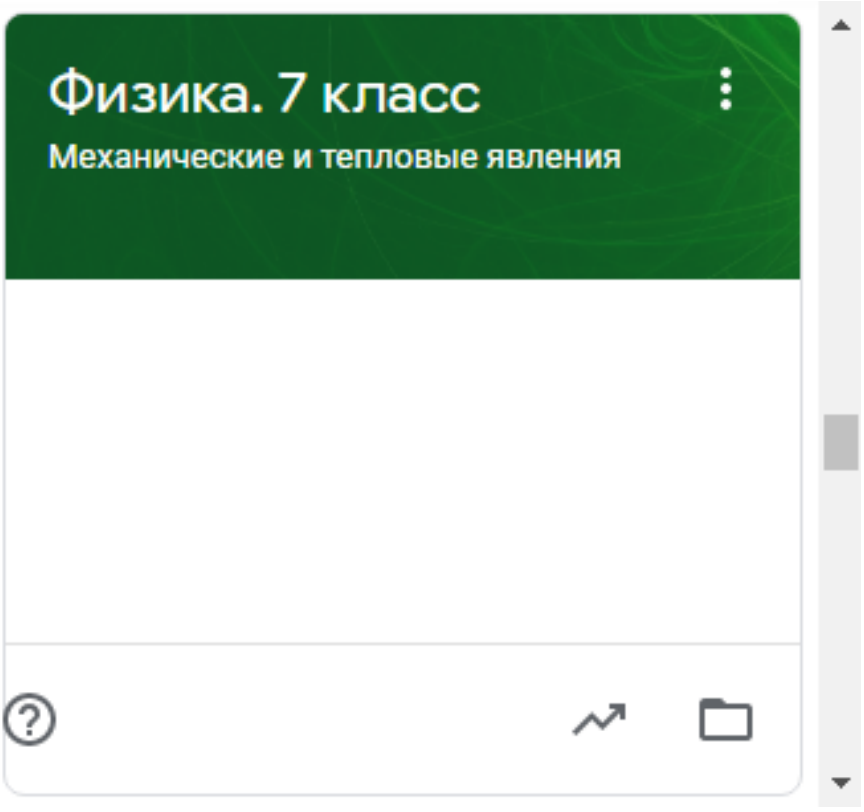


Рис. 7. Титульная страница онлайн-курса по физике для седьмого класса общеобразовательной школы, созданном при помощи инструментария Google Classroom.

На рис. 7 представлено изображение титульной страницы онлайн-курса по физике для седьмого класса общеобразовательной школы, созданном при помощи инструментария Google Classroom.

Проводилась качественная апробация избранных элементов онлайн-курса по физике в седьмых классах в МБОУ СШ № 48 имени Героя России Д. С. Кожемякина, находящейся по адресу город Ульяновск, улица Амурская, 10. В процессе работы в школы был апробирован онлайн-курс по физике для седьмого класса общеобразовательной школы, который является частью авторской системы подготовки по физике в общеобразовательной школе, реализованной в 2019-2021 годах в МБОУ СШ № 48 имени Героя России Д. С. Кожемякина в городе Ульяновске. Использование инструментов дистанционного обучения в технологии смешанного обучения физике позволяет активизировать визуальный канал восприятия теоретической информации по физике, разнообразить сам учебный материал, автоматизировать контроль учебной деятельности по физике. Активно используются на занятиях Google-формы. В качестве примера можно привести формы из темы по взаимодействию тел, в которой реализована возможность тестирования обучающихся по пройденной теме.

Заключение

В работе разработан онлайн-курс по физике, предназначенный для учащихся седьмых классов общеобразовательной школы. В процессе работы создан онлайн-курс по физике для седьмого класса общеобразовательной школы, который является частью авторской системы подготовки по физике в седьмых классах общеобразовательной школы, реализованной в 2019-2021 годах в МБОУ СШ № 48 имени Героя России Д. С. Кожемякина в городе Ульяновске. Использование инструментов дистанционного обучения в технологии смешанного обучения физике позволяет активизировать визуальный канал восприятия теоретической информации по физике, разнообразить сам учебный материал, автоматизировать контроль учебной деятельности по физике. Разработан онлайн-курс по физике для седьмых классов в общеобразовательной школе, базирующийся на системно-деятельностном подходе изучения физики. Основные элементы онлайн-курса по физике для седьмых классов в общеобразовательной школе направлены на создание и реализацию условий, способствующих формированию у обучаемых творческого подхода к изучению физики, качественного освоения теоретической информации по физике, её критического анализа, поиска нестандартных подходов к решению сложных физических задач. Разработанный онлайн-курс по физике может эффективно применяться в системе подготовки по физике в восьмых седьмых общеобразовательной школы в рамках использования смешанной технологии обучения физике. Результат разработки и частичного применения онлайн-курса по физике в 2019-2021 годах показал оптимальность комбинации использования традиционных и компьютерных методов обучения и диагностики учащихся по физике в седьмых классах общеобразовательной школы.

Результатом разработки информационной поддержки системы изучения физики в седьмом классе общеобразовательной школы стало создание Google-класса по физике для седьмого класса общеобразовательной школы. Онлайн-курс по физике для седьмого класса, созданный на основе Google-класса, содержит теоретические материалы, ссылки на внешние образовательные ресурсы, элементы контроля знаний по физике. Разработанная информационная система поддержки системы подготовки по физике в седьмых классах общеобразовательной школы может эффективно применяться в рамках использования смешанных и дистанционных технологий обучения физике.

Гипотеза исследования, представляющая собой предположение о том, что если разработать онлайн-курс по физике для седьмых классов в общеобразовательной школе,

основанный на дидактически обработанной связи элементов курса, позволяющей организовать процесс творческого применения учащимися знаний по физике, то можно реализовать сбалансированную систему подготовки с использованием технологии смешанного обучения физике в седьмых классах в общеобразовательной школы, подтверждена полностью.

Онлайн-курсы являются одной из самых ценных составляющих образовательной информационной среды. Именно в онлайн-курсах концентрируется содержательная составляющая учебного процесса и хранятся результаты обучения. Значение онлайн-курсов в учебном процессе существенно большее, чем у обычных бумажных пособий, поскольку новые образовательные технологии предполагают сокращение персональных контактов преподавателя и учащегося с увеличением доли самостоятельной подготовки. Поэтому материалы онлайн-курсов принимают на себя поддержку части тех компонент обучения, которые в стандартном учебном процессе обеспечиваются очным общением учителя и ученика.

Использование онлайн-курса по физике способствует интенсификации учебного процесса и более осмысленному изучению теоретического материала по физике в рамках программы базового курса физики в седьмых классах общеобразовательной школы, приобретению навыков самоорганизации и превращению систематических знаний в системные, помогает развитию поисковой и познавательной деятельности учащихся и интереса к физике.

Достоверность выводов определяется апробацией основных положений исследования в практике преподавания физики в седьмых классах общеобразовательной школы.

Онлайн-курс по физике можно рассматривать, как эффективный инструмент для формирования и роста познавательного интереса у учащихся к физике. Поэтому онлайн-курс по физике может стать частью системы подготовки по физике в седьмых классах общеобразовательной школы.

Список использованных источников

1. Бубликов С. В., Голубовская М. П. Электронные дидактические разработки к модулю “Волновая оптика” // Учебный эксперимент в образовании. — 2011. — № 2. — С. 16–22.

2. Благодинова В. В., Винник В. К., Толстенева А. А. Модульная объектно-ориентированная учебная среда как средство организации самостоятельной работы студентов // Вестник Нижегородского университета имени Н. И. Лобачевского. — 2013. — № 5-2. — С. 28–32.

3. Благодинова В. В. Организация самостоятельной работы студентов по физике на базе модульной объектно-ориентированной динамической учебной среды (MOODLE) // Вестник Мининского университета. — 2013. — № 1 (1). — С. 11–11.

4. 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.

5. 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.

6. Алтунин К. К., Коннова Т. С. Исследование информационных образовательных сред и электронных учебников на примере темы “Фотоэффект” // В сборнике: Актуаль-

ные вопросы преподавания технических дисциплин Материалы Всероссийской заочной научно-практической конференции. — 2016. — С. 11–16.

Сведения об авторах:

Алеся Алексеевна Карташова — магистрант факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: alesya_alekseevna@inbox.ru

ORCID iD 0000-0002-0093-9013

Web of Science ResearcherID AAZ-8166-2020

Designing online course elements of an online physics course for the eighth grade of a comprehensive school

A. A. Kartashova

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted June 1, 2021
Resubmitted June 18, 2021
Published September 9, 2021

Abstract. The process of creating an online course in physics for the seventh grade of a comprehensive school using the Google Classroom tools is considered. The description of some elements of the online course in physics within the framework of topics on mechanical and thermal phenomena, the interaction of bodies, work, power, energy, pressure of solids, gases, liquids for the seventh grade of a comprehensive school is given. The elements of the online course in physics within the framework of topics on mechanical and thermal phenomena, the interaction of bodies, work, power, energy, pressure of solids, gases, liquids include materials with theoretical information on sections of physics of the seventh grade of a comprehensive school and materials for knowledge control in the form tasks, control questions, control polls and tests. For elements of knowledge control in the form of tasks, control questions and tests, you can set deadlines for submitting works in accordance with the thematic planning of a physics course for the seventh grade of a comprehensive school. With the help of an online course in physics in the seventh grade of a comprehensive school, it is possible to implement the process of providing continuous information support for the process of studying physics in the seventh grade of a comprehensive school.

Keywords: physics, mechanical phenomena, interaction of bodies, thermal phenomena, work, power, energy, pressure, distance course, online course, mixed learning technology, comprehensive school, knowledge control

PACS: 01.40.E-

References

1. Blagodinova V. V., Vinnik V. K., Tolsteneva A. A. Modular object-oriented learning environment as a means of organizing students' independent work // Bulletin of Nizhny Novgorod University named after N. I. Lobachevsky. — 2013. — no. 5-2. — P. 28–32.

2. Blagodinova V. V. Organization of students' independent work in physics based on a modular object-oriented dynamic learning environment (MOODLE) // Bulletin of Minin University. — 2013. — no. 1 (1). — P. 11–11.

3. Altunin K. K. Development of an electronic educational resource at the university using the Google Site and MOODLE tools // Volga region pedagogical search. — 2017. — no. 3 (21). — P. 116–124.

4. Altunin K. K., Konnova T. S. Research of information educational environments and electronic textbooks on the example of the topic " Photo effect " // In the collection: Topical issues of teaching technical disciplines Materials of the All-Russian correspondence scientific and practical conference. — 2016. — P. 11–16.

5. Altunin K. K. Development and implementation of an electronic course on nano-optics // In the book: Actual problems of physical and functional electronics materials of the 19th All-Russian youth scientific school-seminar. — 2016. — P. 128–129.

6. Bublikov S. V., Golubovskaya M. P. Electronic didactic development for the module "Wave optics" // Study experiment in education. — 2011. — no. 2. — P. 16–22.

Information about authors:

Alesya Alekseevna Kartashova — Master's student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ulyanovsk State Pedagogical University", Ulyanovsk, Russia.

E-mail: alesya_alekseevna@inbox.ru

ORCID iD 0000-0002-0093-9013

Web of Science ResearcherID AAZ-8166-2020

УДК 372.8
ББК 74.489
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 13.00.02

Исследование возможностей и перспектив совершенствования методологии и методики преподавания интерактивных технологий обучения физике в педагогическом университете

Е. Е. Волкова [1]

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

Поступила в редакцию 7 июня 2021 года
После переработки 17 июня 2021 года
Опубликована 9 сентября 2021 года

Аннотация. Обсуждаются результаты преподавания учебных дисциплин по интерактивным технологиям в теории и методике обучения физике на педагогических направлениях подготовки физико-математического профиля подготовки в педагогическом университете. Один из блоков дисциплин по выбору блока дисциплин предметной подготовки бакалавриата педагогического направления подготовки физико-математического профиля включает в себя учебную дисциплину “Интерактивные технологии в теории и методике обучения физике”. Один из блоков дисциплин по выбору блока дисциплин предметной подготовки магистратуры педагогического направления подготовки по магистерской программе “Приоритетные направления подготовки в физическом образовании” включает в себя учебную дисциплину “Интерактивные и мультимедиа технологии в обучении физике и астрономии”. Описаны результаты применения рейтинговой системы оценки знаний по учебным дисциплинам: “Интерактивные технологии в теории и методике обучения физике”, “Интерактивные и мультимедиа технологии в обучении физике и астрономии”.

Ключевые слова: интерактивные технологии, мультимедиа технологии, теории и методика обучения физике, методика преподавания физики, физика, астрономия, предметная подготовка, бакалавриат, магистратура, рейтинговая система оценки знаний

PACS: 01.40.-d

Введение

Рассмотрим особенности преподавания интерактивных технологий обучения физике и астрономии в рамках очного бакалавриата и очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки физико-математического профиля в педагогическом университете. Один из блоков дисциплин по выбору блока дисциплин предметной подготовки бакалавриата педагогического направления подготовки физико-математического профиля включает в себя учебную дисциплину “Интерактивные технологии в теории и

[1] E-mail: liza_volkova1999@mail.ru

методике обучения физике". Один из блоков дисциплин по выбору блока дисциплин предметной подготовки магистратуры педагогического направления подготовки по магистерской программе "Приоритетные направления подготовки в физическом образовании" включает в себя учебную дисциплину "Интерактивные и мультимедиа технологии в обучении физике и астрономии". Описаны результаты применения рейтинговой системы оценки знаний по учебным дисциплинам: "Интерактивные технологии в теории и методике обучения физике", "Интерактивные и мультимедиа технологии в обучении физике и астрономии".

Целью исследования являются разработка, научное обоснование и совершенствование методики преподавания интерактивных технологий обучения физике и астрономии в рамках очного бакалавриата и очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки физико-математического профиля в педагогическом университете.

В связи с поставленной целью была сформулирована задача наблюдения за результатами проведения педагогического эксперимента по апробации методики преподавания интерактивных технологий обучения физике и астрономии в рамках очного бакалавриата и очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки физико-математического профиля в педагогическом университете.

Объектом исследования являются процесс преподавания интерактивных технологий обучения физике и астрономии в рамках очного бакалавриата и очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки физико-математического профиля в педагогическом университете.

Предметом исследования является процесс формирования учебных умений использования интерактивных технологий в физике и астрономии в рамках преподавания интерактивных технологий обучения физике и астрономии в рамках очного бакалавриата и очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки с профилем обучения по физике и математике в педагогическом университете.

Гипотеза исследования заключается в том, что процесс преподавания интерактивных технологий в физике и астрономии ориентирован на формирование у студентов практических навыков и умений использовать интерактивные и мультимедиа технологий в преподавании физики и астрономии, и будет более результативным при организации систематического контроля знаний по интерактивным технологиям обучения физике и астрономии.

Научная новизна работы заключается в широком использовании различных информационных и интерактивных технологий по взаимодействию студентов между собой, студентов с преподавателем при изучении фундаментальных понятий и законов физики и астрономии с использованием интерактивных технологий обучения физике и астрономии в рамках очного бакалавриата и очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки физико-математического профиля в педагогическом университете.

В качестве метода исследования применяется наблюдение за результатами проведения педагогического эксперимента по апробации методики преподавания интерактивных технологий обучения физике и астрономии в рамках очного бакалавриата и очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки физико-математического профиля в педагогическом университете. Изучаются методические приёмы и способы решения задач по физике и астрономии с использованием интерактивных технологий обучения физике и астрономии в рамках очного бакалавриата и очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки физико-математического профиля в педагогическом университете.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что созданные методические материалы по преподаванию интерактивных технологий обучения физике и

астрономии могут быть использованы в создании новой методологии обучения преподаванию интерактивных технологий обучения физике и астрономии в рамках очного бакалавриата и очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки физико-математического профиля в педагогическом университете, пополнении научной базы актуальными методическими материалами по преподаванию интерактивных технологий обучения физике и астрономии.

Практическая значимость исследования заключается в выявлении характерных особенностей преподавания интерактивных технологий обучения физике и астрономии в рамках очного бакалавриата и очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки физико-математического профиля в педагогическом университете.

Обзор литературы

Технологии создания различных электронных средств обучения, электронных учебников, электронных курсов были рассмотрены в работах[1,2].

Особенности разработки мультимедийных электронных учебников обсуждались в работах [3, 4]. Обзор основных методов и средств подготовки электронных изданий представлен в работе [5]. Использование трёхмерной интерактивной графики в электронных учебниках рассматривалось в работе [6]. Объектно-ориентированный подход к созданию электронных учебников был развит в работе [7]. Научно-методический подход к созданию электронных учебников был развит в работе [8].

Интерактивные компьютерные программы активизируют все виды деятельности человека: мыслительную, речевую, физическую, перцептивную, что ускоряет процесс усвоения материала [9]. Компьютерные тренажеры способствуют приобретению практических навыков. Интерактивные тестирующие системы анализируют качество знаний. Одним словом, применение мультимедиа-средств и мультимедиа-технологий позволяет построить такую схему обучения, в которой разумное сочетание обычных и компьютерных форм организации учебного процесса даёт новое качество в передаче и усвоении системы знаний. С психологической точки зрения, электронный учебник облегчает понимание изучаемого материала за счёт других методов подачи материала: индуктивный подход, воздействие на слуховую и эмоциональную память, которые не участвуют в обычных учебниках.

На базе интернет-технологий принято выделять следующие формы организации обучения: телелекция и медиа-лекция (аудио-презентация, видео-презентация, слайд-презентация, текстовая с гиперссылками на медиа-объекты); консультации (индивидуальные, групповые; техническая база: электронная почта, форумы, чаты); семинары (аудиоконференция, видеоконференция, эпистоконференция); проекты (групповые, индивидуальные исследовательские, творческие, информационные, техническая база: все сервисы интернета); лабораторно-практические занятия; индивидуальные (домашние) задания (эссе, рефераты, задачи); контроль (online-тестирование, экзамены, зачёт; требуется специализированное программное обеспечение); игры (обучающие, ролевые и др.); ситуационный анализ (кейс-стадии).

Дистанционное обучение обеспечивает максимальную степень восприятия учебного материала, за счёт использования таких инструментов, как: мультимедийное представление информации (текст, видео, аудио, графика, анимация), интуитивно понятный и удобных интерфейс системы, не требующий каких-либо специальных знаний от пользователей, представление взаимосвязи различных аспектов учебного материала, стандартизация форматов представления слушателю учебного материала, структурирование учебного текста, большое количество справочной информации, сопровождающей курсы. Для обеспечения эффективности существующей системы непрерывного образования дистанционное обучение должно активно опираться на весь спектр инноваций

традиционного обучения и использовать телекомуникационные сети различного уровня. Однако технологические особенности дистанционного обучения привносят свою специфику в традиционные формы обучения. Основными дистанционными образовательными технологиями являются кейсовая технология, телекоммуникационная технология, интернет-технология.

В [10] описана разработка электронного образовательного ресурса в университете при помощи инструментов Google Site и MOODLE, а также проведено сравнение возможностей платформ Google Site и MOODLE для создания электронных образовательных ресурсов по физике.

В работе [11] проводилось исследование электронного образовательного ресурса по физике на примере темы "Фотоэффект", созданных с использованием инструментов Google Sites. Электронный образовательный ресурс по теме "Фотоэффект" создан в виде сайта с совместным доступом для определённой группы студентов. Использование электронного образовательного ресурса позволяет более организованно подойти к изучению темы и хранению теоретических и методических материалов, а также организации круглосуточного доступа к учебным материалам электронного курса.

В [12] описана разработка и внедрение электронного курса по нанооптике. Рассматриваемый в этой работе электронный курс по нанооптике имеет структуру сайта.

В этой связи актуальным является разработка концепций построения и использования компьютерных обучающих средств, в частности дистанционных курсов, адекватных идеям развития открытого, смешанного и дистанционного образования.

Результаты педагогического эксперимента

В ходе педагогического эксперимента проводилось наблюдение за результатами преподавания учебных дисциплин, связанных с интерактивными технологиями в физике. В программе очного бакалавриата по направлению подготовки "Педагогическое образование" с двойным профилем подготовки по физике и математике была учебная дисциплина "Интерактивные технологии в теории и методике обучения физике" в 2019 году. Учебная дисциплина "Интерактивные технологии в теории и методике обучения физике" читалась в 10 семестре бакалавриата в рамках блока дисциплин по выбору. На дисциплину по выбору "Интерактивные технологии в теории и методике обучения физике" записалось девять человек в 2019 году. Трудоёмкость учебной дисциплины "Интерактивные технологии в теории и методике обучения физике" составляет 4 зачётные единицы. Согласно рейтинговой системе оценки максимально можно набрать 400 баллов. Максимальная рейтинговая оценка за текущую работу в семестре 336 баллов. В том числе были запланированы две контрольные работы с оценкой по 32 балла за каждую контрольную работу. Максимальная рейтинговая оценка на экзамене составляет 64 балла. По результатам изучения учебной дисциплины "Интерактивные технологии в теории и методике обучения физике" были выставлены следующие баллы: студент 1 набрал 398 баллов, студент 2 набрал 394 балла, студент 3 набрал 400 баллов, студент 4 набрал 400 баллов, студент 5 набрал 399 баллов, студент 6 набрал 18 баллов, студент 7 набрал 398 баллов, студент 8 набрал 373 баллов, студент 9 набрал 394 баллов. По итогам изучения учебной дисциплины "Интерактивные технологии в теории и методике обучения физике" согласно рейтинговой системе оценки были выставлены следующие оценки: восемь оценок "отлично", одна оценка "не явился". Ступень обученности студентов по итогам изучения учебной дисциплины "Интерактивные технологии в теории и методике обучения физике" составила 89.7% и находится на оптимальном уровне. Восемь из девяти студентов проявили творческий подход к изучению учебной дисциплины "Интерактивные технологии в теории и методике обучения физике". Этот результат говорит об успешности изучения интерактивных технологий в теории и ме-

тодике обучения физике в рамках очного бакалавриата по направлению подготовки "Педагогическое образование" с профилем подготовки по физике и математике.

В программе очной магистратуры по направлению подготовки "Педагогическое образование" на магистерской программе "Приоритетные направления науки в физическом образовании" была учебная дисциплина "Интерактивные и мультимедиа технологии в обучении физике и астрономии" в 2019 году. Учебная дисциплина "Интерактивные и мультимедиа технологии в обучении физике и астрономи" читалась на первом курсе во втором семестре очной магистратуры по направлению подготовки "Педагогическое образование" на магистерской программе "Приоритетные направления науки в физическом образовании". Трудоёмкость учебной дисциплины "Интерактивные и мультимедиа технологии в обучении физике и астрономии" составляет 2 зачётные единицы. Согласно рейтинговой системе оценки максимально можно набрать 200 баллов. В том числе была запланирована контрольная работа с оценкой в 40 баллов. Максимальная рейтинговая оценка за текущую работу в семестре 161 балл. Максимальная рейтинговая оценка на зачёте составляет 39 баллов. По результатам изучения учебной дисциплины "Интерактивные и мультимедиа технологии в обучении физике и астрономии" были выставлены следующие баллы: студент 1 набрал 0 баллов, студент 2 набрал 200 баллов, студент 3 набрал 62 балла, студент 4 набрал 170 баллов, студент 5 набрал 0 баллов, студент 6 набрал 62 балла, студент 7 набрал 62 балла, студент 8 набрал 200 баллов, студент 9 набрал 200 баллов, студент 10 набрал 200 баллов, студент 11 набрал 0 баллов. Оценка "зачтено" выставлялась за рейтинг по учебной дисциплине от 61 до 200 баллов. По итогам изучения учебной дисциплины "Интерактивные и мультимедиа технологии в обучении физике и астрономии" согласно рейтинговой системе оценки были выставлены следующие оценки: восемь оценок "зачтено", три оценке "не явился". Перевод в пятибалльные оценки даёт следующие оценки: четыре оценки "отлично", одна оценка "хорошо", три оценки "удовлетворительно" и трое студентов не явились на зачёт. Ступень обученности студентов по итогам изучения учебной дисциплины "Интерактивные и мультимедиа технологии в обучении физике и астрономии" составила 53.9% и находится на допустимом уровне.

Использование совокупности интерактивных и мультимедиа технологий в смешанном и дистанционном образовании по физике и астрономии как эффективного образовательного средства позволит иметь возможность последовательно изучить теоретическую информацию по основным темам курсов физики и астрономии, осуществив реализацию необходимого уровня доступности образования в области физики и астрономии в педагогическом университете, сняв временные, географические и прочие ограничения, при сохранении его качества, совершенствуя и развивая курсы по физике и астрономии, максимально используя достоинства индивидуального обучения и массового обучения; использовать богатые возможности информационных и дистанционных технологий обучения физике и астрономии в представлении теоретического материала по физике и астрономии, контроля выполнения заданий и задач, делая его максимально наглядным, а потому понятным и запоминающимся; создать условия для непрерывного образования; освободить преподавателя от некоторых функций по передаче теоретической информации по курсам физики и астрономии, консультанта и контроллера, а также освободить время для индивидуальной, дополнительной работы с обучаемым; реализовывать технологию обучения физике и астрономии, распределённую во времени (обучаемый не привязан к времени занятия и к преподавателю, а значит, может обучаться в удобном для него темпе); развить навыки самостоятельной работы, востребованные в современной жизни и повысить сознательность, активность обучающихся при руководящей роли преподавателя; уменьшить материальные расходы на обучение.

Заключение

Для повышения качества обучения на занятиях по дисциплинам, связанным с изучением интерактивных и мультимедиа технологий, использовались различные компьютерные, информационные и интерактивные технологии такие, как решение физических задач с использованием элементов программирования, использование электронных образовательных ресурсов, образовательных сайтов и дистанционных курсов для информационной поддержки изучения интерактивных технологий обучения физике и астрономии. Использование электронных образовательных ресурсов, образовательных сайтов и дистанционных курсов позволяет в онлайн режиме изучать как простые, так и сложные для понимания закономерности физических явлений. Использование электронных образовательных ресурсов, образовательных сайтов и дистанционных курсов по блоку специальных дисциплин физико-технической направленности позволяет также осуществлять планомерный и систематический контроль знаний с использованием методов тестового контроля. Для этого в составе курса по интерактивным технологий обучения физике и астрономии разработаны тесты по отдельным темам и контрольные тесты по всему курсу.

На успешность проведения педагогического эксперимента повлияли наличие необходимых компьютерных и информационных средств обучения интерактивным технологиям обучения физике и астрономии: это и наличие компьютера, проектора, лабораторного оборудования в кабинете, соответствующий инструментарий и инвентарь. На стенах имеются плакаты, которые дают основные знания по физике и астрономии. Для воспроизведения визуальной информации в кабинетах имеется проекционная аппаратура: мультимедиа-проектор, компьютер и экран.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что процесс преподавания интерактивных технологий в физике и астрономии ориентирован на формирование у студентов практических навыков и умений использовать интерактивные и мультимедиа технологий в преподавании физики и астрономии, и будет более результативным при организации систематического контроля знаний по интерактивным технологиям обучения физике и астрономии, подтверждена полностью.

Таким образом, использование интерактивных и мультимедиа технологий при смешанной или дистанционной форме дистанционной образования как образовательного средства позволит: иметь возможность самостоятельно изучить дополнительную информацию параллельно с базовым курсом; реализовать принципиально новый уровень доступности образования, сняв временные, географические и прочие ограничения, при сохранении его качества; объединить очную и заочную формы обучения, совершенствуя и развивая их, максимально используя достоинства индивидуального обучения (эффективность) и массового (экономичность); использовать богатые возможности информационных технологий в представлении учебного материала, делая его максимально наглядным, а потому понятным и запоминающимся; создать условия для непрерывного образования; освободить преподавателя от некоторых функций передатчика информации, консультанта и контроллера, а также освободить время для индивидуальной, дополнительной работы с обучаемым; реализовывать технологию обучения, распределенную во времени (обучаемый не привязан к времени занятия и к преподавателю, а значит, может обучаться в удобном для него темпе); развить навыки самостоятельной работы, востребованные в современной жизни и повысить сознательность, активность обучающихся при руководящей роли преподавателя; уменьшить материальные расходы на обучение.

Список использованных источников

1. Теория и практика создания образовательных электронных изданий / С. Г. Григорьев [и др.]. — Москва : Издательство РУДН, 2003. — 241 с.
2. Гафурова А. Я., Иванов В. Г., Хацринова О. Ю. Технология создания электронного учебника // Вестник Казанского технологического университета. — 2006. — № 3. — С. 258–261.
3. Prikhodko W., Melezinek A., Petrova L. Development of New Multimedia Course on Engineering Pedagogic. — Vol. In: "Joint Forces in Engineering Education Towards Excellence" (1-4 July 2007). — Miskolc, Hungary : SEFI-IGIP Joint Annual Conference, 2007. — P. 85–86.
4. Винницкий Ю. А., Нурмухамедов Г. М. Принципы разработки электронных мультимедийных учебников для средней школы // Информатика и образование. — 2006. — № 10. — С. 95–98.
5. Гасов В. М., Цыганенко А. М. Методы и средства подготовки электронных изданий: учебное пособие. — Москва : МГУП, 2001. — 735 с.
6. Бойков Е. В. Использование трёхмерной интерактивной графики в электронных учебниках // Инновации в непрерывном образовании. — 2012. — № 4. — С. 64–68.
7. Бойков Е. В. Объектно-ориентированный подход к созданию электронных учебников // Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В. П. Астафьева. — 2011. — № 2. — С. 39–46.
8. Петрова Л. Г., Чудина О. В., Остроух А. В. Научно-методический подход к созданию электронного учебника по материаловедению // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. — 2009. — № 46. — С. 149–152.
9. Шеломовский В. В. Интерактивные электронные учебники // Компьютерные инструменты в образовании. — 2007. — № 6. — С. 39–42.
10. 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.
11. Алтунин К. К., Коннова Т. С. Исследование информационных образовательных сред и электронных учебников на примере темы "Фотоэффект" // В сборнике: Актуальные вопросы преподавания технических дисциплин Материалы Всероссийской заочной научно-практической конференции. — 2016. — С. 11–16.
12. 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.

Сведения об авторах:

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

E-mail: liza_volkova1999@mail.ru

ORCID iD 0000-0003-2849-7090

Web of Science ResearcherID AAZ-9027-2020

Investigation of the possibilities and prospects for improving the methodology and methods of teaching interactive technologies for teaching physics at the Pedagogical University

E. E. Volkova

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted June 7, 2021
Resubmitted June 17, 2021
Published September 9, 2021

Abstract. The results of teaching academic disciplines on interactive technologies in the theory and methodology of teaching physics in the pedagogical areas of training in the physical and mathematical profile of training at the Pedagogical University are discussed. One of the blocks of disciplines for the choice of the block of disciplines for the subject preparation of the bachelor's degree in the pedagogical direction of the preparation of the physical and mathematical profile includes the academic discipline "Interactive Technologies in the Theory and Methods of Teaching Physics". One of the blocks of disciplines for the choice of the block of disciplines for the subject preparation of the master's program in the pedagogical direction of training for the master's program "Priority areas of training in physical education" includes the academic discipline "Interactive and multimedia technologies in teaching physics and astronomy". The results of applying the rating system for assessing knowledge in academic disciplines are described: "Interactive technologies in the theory and methods of teaching physics", "Interactive and multimedia technologies in teaching physics and astronomy".

Keywords: interactive technologies, multimedia technologies, theories and methods of teaching physics, methods of teaching physics, physics, astronomy, subject training, undergraduate, graduate, rating system for assessing knowledge

PACS: 01.40.gf

References

1. Theory and practice of creating educational electronic publications / S. G. Grigoriev [et al.]. — Moscow : RUDN University Publishing House, 2003. — 241 p.

2. Gafurova A. Ya., Ivanov V. G., Khatsrinova O. Yu. Technology for creating an electronic textbook // Bulletin of Kazan Technological University. — 2006. — no. 3. — P. 258–261.

3. w. Prikhodko, Melezinek A., Petrova L. Development of New Multimedia Course on Engineering Pedagogy. — Vol. In the proceedings: "Joint Forces in Engineering Education Towards Excellence" (1-4 July 2007). — Miskolc, Hungary : SEFI-IGIP Joint Annual Conference, 2007. — P. 85–86.

4. Vinnitsky Yu. A., Nurmukhamedov G. M. Principles for the development of electronic multimedia textbooks for secondary schools // Computer science and education. — 2006. — no. 10. — P. 95–98.

5. Gasov V. M., Tsyganenko A. M. Methods and means of preparing electronic publications: tutorial. — Moscow : MGUP, 2001. — 735 p.

6. Boikov E. V. Using 3D Interactive Graphics in Electronic Textbooks // Innovations in Lifelong Education. — 2012. — no. 4. — P. 64–68.

7. Boikov E. V. Object-oriented approach to creating electronic textbooks // Bulletin of the Krasnoyarsk State Pedagogical University. V. P. Astafieva. — 2011. — no. 2. — P. 39–46.

8. Petrova L. G., Chudina O. V., Ostroukh A. V. Scientific and methodological approach to creating an electronic textbook on materials science // Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University. — 2009. — no. 46. — P. 149–152.

9. Shelomovsky V. V. Interactive e-tutorials // Computer tools in education. — 2007. — no. 6. — P. 39–42.

10. Altunin K. K. Development of an electronic educational resource at the university using Google Site and MOODLE tools // Volga region pedagogical search. — 2017. — no. 3 (21). — P. 116–124.

11. Altunin K. K., Konnova T. S. Research of information educational environments and electronic textbooks, for example, the topic “Photoeffect” // In the proceedings: Topical issues of teaching technical disciplines Proceedings of the All-Russian Correspondence Scientific and Practical Conference. — 2016. — P. 11–16.

12. Altunin K. K. Development and implementation of an electronic course on nanooptics // In the proceedings: Actual problems of physical and functional electronics materials of the 19th All-Russian Youth Scientific School-Seminar. — 2016. — P. 128–129.

Information about authors:

Elizaveta Evgenievna Volkova – student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russia.
E-mail: liza_volkova1999@mail.ru
ORCID iD 0000-0003-2849-7090
Web of Science ResearcherID AAZ-9027-2020

Секция 2

Физико-математические науки

УДК 535.3
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 01.04.05

Исследование оптического пропускания и отражения нанокомпозита с включениями из углеродных наноматериалов

К. К. Алтунин, Е. В. Торутанова [1]

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

Поступила в редакцию 7 июня 2021 года
После переработки 17 июня 2021 года
Опубликована 9 сентября 2021 года

Аннотация. Рассматриваются результаты исследования оптического пропускания и отражения нанокомпозита с наноразмерными включениями из углеродных наноматериалов. Построена теоретическая модель для описания оптических процессов в нанокомпозитных структурах с наноразмерными включениями из углеродных нанотрубок. Модифицирован метод численного расчёта эффективных оптических параметров нанокомпозитных структур с включениями из углеродных нанотрубок. Построена численная модель оптических процессов в нанокомпозитных структурах с включениями из углеродных нанотрубок и разработана компьютерная программа на языке программирования Python для вычисления оптических характеристик нанокомпозитной структуры с включениями в виде углеродных нанотрубок. Проведённые численные расчёты оптических параметров нанокомпозитной структуры с углеродными нанотрубками показали, что можно существенно увеличить оптическое пропускание при определённых геометрических параметрах нанокомпозитной структуры с углеродными нанотрубками.

Ключевые слова: нанокомпозит, нанокомпозитная плёнка, углеродный наноматериал, оптическое излучение, коэффициент оптического пропускания, коэффициент оптического отражения, просветляющее оптическое покрытие, оптические приборы, нанотрубка

PACS: 42.25.Bs

[1] E-mail: ekaterina.torutanova@yandex.ru

Введение

В настоящее время интенсивно развиваются технологии получения наноструктурных материалов, в том числе наноструктурные материалы, содержащие включения в виде нанотрубок, комплексов и агрегатов на основе нанотрубок, что приведёт к созданию новых наноразмерных оптоэлектронных приборов.

Актуальность исследования обусловлена возрастающим интересом к наноструктурным материалам, а также оптическим свойствам наноструктурных материалов с включением нанотрубок.

Целью работы является исследование оптических свойств нанокомпозитных структур с включениями их углеродных нанотрубок. Для достижения цели фундаментального исследования сформулированы следующие задачи:

1. написание обзора литературы по физическим свойствам нанокомпозитов,
2. создание теоретической модели для описания оптических нанокомпозитной среды с углеродными нанотрубками,
3. проведение расчётов оптических характеристик нанокомпозитной среды с углеродными нанотрубками.

Объектом исследования является нанокомпозитная среда с включениями в виде углеродных нанотрубок.

Предметом исследования является совокупность оптических свойств нанокомпозитной среды с включениями в виде углеродных нанотрубок, находящимися во внешнем поле оптического излучения.

Гипотеза исследования состоит в том, что если обобщить результаты теоретических и численных расчётов оптических свойств нанокомпозитных сред с включениями в виде углеродных нанотрубок, то можно предложить метод для адекватного оптического описания характеристик наноразмерного оптоэлектронного прибора на основе нанокомпозитных структур с включениями в виде углеродных нанотрубок.

Методы исследования включают в себя набор теоретических и численных методов нанооптики, включая методы программирования физических задач на языках программирования высокого уровня.

Обзор научных работ по физическим свойствам нанокомпозитов и наноструктур с углеродными наноматериалами и углеродными нанотрубками

Различные углеродные нанотрубки и нанокомпозиты, созданные на основе нанотрубок, являются наиболее часто упоминаемыми строительными блоками нанотехнологий. С удвоенной прочностью на растяжение стали, теплопроводностью лучше, чем у всех, кроме самого чистого алмаза, и электрической проводимостью, подобной меди, но способной проводить гораздо более высокие электрические токи, углеродные нанотрубки кажутся удивительным материалом.

На самом деле нанотрубки бывают разных видов: длинные, короткие, одностенные, многостенные, открытые, закрытые, с различными типами спиральной структуры. Каждый тип имеет свои специфические производственные затраты и области применения. Некоторые были произведены в больших количествах в течение многих лет, в то время как другие только сейчас производятся в промышленных масштабах с достойной

чистотой и в количествах, превышающих несколько грамм. Одной из основных классификаций углеродных нанотрубок являются одностенные разновидности, которые имеют единственную цилиндрическую стенку, и многостенные разновидности, которые имеют цилиндры внутри цилиндров.

В конце 1991 года было предсказано, что углеродные нанотрубки в зависимости от их структуры и диаметра могут быть металлическими или полупроводниковыми. На основании теоретических исследований было указано, что нанотрубки могут демонстрировать экзотическое квантово-механическое поведение в присутствии магнитного поля. В отсутствие чистого материала было трудно интерпретировать теоретический расчет, сделанный для электронных свойств нанотрубок. Позже, модифицированные пути синтеза для получения чистого материала и эффективные методы очистки позволили электронное измерение нанотрубок на индивидуальном уровне. Научные публикации, появившиеся на нанотрубках, к настоящему времени показали, что электронные свойства нанотрубок могут довольно широко варьироваться в зависимости от степени их кристаллического порядка. Многие группы исследовали удельное сопротивление отдельных нанотрубок и их температурную зависимость.

Одностенные углеродные нанотрубки определяются как одномерные аллотропы углерода цилиндрической формы, которые имеют высокую площадь поверхности и большое отношение длины к диаметру. Из-за малого диаметра углеродных нанотрубок и большого соотношения сторон углеродные нанотрубки с одной стенкой считаются одномерным материалом. Одностенные углеродные нанотрубки названы так из-за полой структуры и количества стенок. Одностенные углеродные нанотрубки сделаны из наноуглеродистых листов толщиной в один атом, которые образуют трубку во время синтеза методом химического осаждения из газовой фазы и являются членами семейства фуллеренов.

Уникальные физические свойства однослойных углеродных нанотрубок обусловлены их одномерным размером, формой, высоким соотношением сторон и sp^2-гибридизированными атомами углерода, расположенными в виде полой трубки. Они состоят из одной нанотрубки из атомов углерода, расположенных в виде шестиугольника, имеющего 5 и 6 членных колец. Существуют различные типы одностенных углеродных нанотрубок, потому что графитовые листы могут быть выращены с разными киральными углами во время синтеза. Истинные одностенные углеродные нанотрубки имеют внешний диаметр 0.7 – 1.2 нм и могут быть длиной от 0.5 до 30 мкм. Более длинные углеродные нанотрубки доступны в виде массива, обладающего характерным размером до 500 мкм.

Одностенные углеродные нанотрубки могут быть использованы для поглощения света, флуоресценции и прозрачных проводящих свойств. Известно, что они успешно делают суперчёрные (светопоглощающие) материалы при использовании массива углеродных нанотрубок (отдельные углеродные нанотрубки, стоящие как лес), потому что свет попадает между отдельными углеродными нанотрубками и не может отражаться обратно на протяжении всей длины нанотрубок, что приводит к поглощению света. Одностенные углеродные нанотрубки имеют настраиваемое ближнее инфракрасное излучение, которое реагирует на изменения локальной диэлектрической функции. Одностенные углеродные нанотрубки использовались при очень низких содержаниях 0.03 мас.% для изготовления прозрачных проводящих плёнок для дисплеев и солнечных элементов для замены оксида индия и олова, который имеет ограниченные глобальные ресурсы.

Одностенные углеродные нанотрубки можно рассматривать как свёрнутый графеновый лист с длинной оболочкой. Нанотрубки обычно имеют отношение длины к диаметру около 1000 и, следовательно, считаются почти одномерными структурами. Одно-

стенные углеродные нанотрубки обычно имеют диаметр, близкий к 1 нм, и в несколько тысяч раз длиннее. Одностенные углеродные нанотрубки обладают отличными электронными свойствами по сравнению с вариантами многостенных углеродных нанотрубок, которые делают их наиболее подходящим кандидатом для миниатюризации электроники для замены микроэлектромеханических систем, которые в настоящее время являются основой современной электроники. Самым основным строительным блоком этих систем является электрический провод, и одностенные углеродные нанотрубки могут быть отличными проводниками. Несмотря на их широкий потенциал в разнообразных нанотехнологических применениях, одностенные углеродные нанотрубки попрежнему очень дороги в производстве, и разработка более доступных методов синтеза жизненно необходима для их применения в промышленных масштабах.

Углеродные нанотрубки с несколькими стенками состоят из нескольких слоёв графита, свернутых коаксиально для образования трубчатой формы. Они неизменно производятся с высокой частотой структурных дефектов. Многослойные углеродные нанотрубки являются структурно достаточно прочными; тем не менее, они часто содержат области структурного несовершенства. Например, структурный дефект, такой как микротрещина в стальной проволоке, приведет к катастрофическому разрушению при 1-2 % теоретической прочности на разрыв, которую можно было бы прогнозировать на основе фундаментальных химических принципов. Несмотря на недостатки, уникальные физические и химические свойства углеродных нанотрубок, такие как структурная жесткость и гибкость, продолжают вызывать значительный интерес. Кроме того, углеродные нанотрубки чрезвычайно прочны, примерно в 100 раз прочнее (устойчивее к нагрузкам), чем сталь, на одну шестую веса. Углеродные нанотрубки также могут действовать как проводники или полупроводники в зависимости от их хиральности и обладают собственной сверхпроводимостью. Это идеальные теплопроводники, которые также могут вести себя как полевые излучатели.

Электронные, оптические, термические и механические свойства одностенных углеродных нанотрубок, которые в последние годы вызывают большой интерес, обусловленный их уникальными физическими свойства и структурой. Один слой атомов углерода удерживается вместе в структуре нанотрубки гибридизированными химическими sp^2-связями. В зависимости от того, как образуется нанотрубка, нанотрубки считаются полупроводниковыми или металлическими по своей природе. Одностенные углеродные нанотрубки инертны и могут использоваться для улучшения механических и проводящих свойств в других материалах.

Дисперсию одностенных углеродных нанотрубок обычно исследуют с помощью ультразвукового зонда с низкой амплитудой, и для стабилизации дисперсий может потребоваться использование поверхностно-активных веществ или высокофункционализированных одностенных углеродных нанотрубок. Также можно для исследования использовать ультразвуковой датчик мощностью 750 Вт, который необходимо включать и выключать каждые 30 секунд, чтобы предотвратить повреждение одностенных углеродных нанотрубок, и настраивать амплитуду звуковой волны примерно до 27%.

Одностенные углеродные нанотрубки представляют собой цилиндрические графитовые трубки диаметром около 1 нм. Они обладают металлическими или полупроводниковыми характеристиками в зависимости от того, как прокатаны графитовые листы. Ожидается, что из-за их замечательных электрических характеристик одностенные углеродные нанотрубки будут использоваться в широком диапазоне применений, таких как полевые транзисторы и проводящие пленки. В таких приложениях в устройствах изготавливаются сети из одностенных углеродных нанотрубок. Таким образом, фундаментальное понимание свойств электрического транспорта в таких сетях имеет большое значение для улучшения характеристик устройства. Сообщалось о ряде ис-

следований по этой проблеме; однако большинство исследований было выполнено на смеси металлических и полупроводниковых одностенных углеродных нанотрубок, поскольку одностенные углеродные нанотрубки образуются в таком смешанном состоянии @auxrussian@auxenglish@auxrussian@auxenglish[1–7]. Предполагается, что в одном пучке нанотрубок на проводимость влияют двумерные процессы слабой локализации из-за интерференции электронных волн, которые классифицируются как квантовые явления переноса [8].

В статье [4] сообщается о зависимости транспортных свойств однослойных плёнок углеродных нанотрубок, легированных органическими молекулами при низкой температуре. Температурная зависимость сопротивления и магнитосопротивления однослойных плёнок углеродных нанотрубок исследована систематически и хорошо объясняется двумерной схемой прыжковой проводимости с переменным диапазоном. Магнитосопротивление резко снижается при легировании, и анализ, основанный на двумерной теории скачкообразного изменения диапазона, показывает, что плотность состояний листа на уровне Ферми даёт монотонное увеличение с увеличением плотности носителей заряда. Прыжок носителей заряда в одностенной углеродной нанотрубке усиливается при легировании.

В статье [5] сообщается об измерениях электрического сопротивления отдельной углеродной нанотрубки при низкой температуре. Магнитное поле, приложенное перпендикулярно оси нанотрубки, увеличивает проводимость и вызывает апериодические колебания. Данные находят глобальную и последовательную интерпретацию в терминах двумерной слабой локализации и универсальных флуктуаций проводимости в мезоскопических проводниках. Размерность электронной системы обсуждается с точки зрения своеобразной структуры углеродных нанотрубок.

В статье [6] были найдены убедительные доказательства перехода металл – изолятор в макроскопические проводники одностенных углеродных нанотрубок.

В статье [8] сообщается об ориентационной зависимости поведения магнитосопротивления жгута с одностенными углеродными нанотрубками. Чёткое разграничение поведения наблюдается между приложением магнитного поля перпендикулярно или параллельно оси жгута. Для перпендикулярного поля наблюдается монотонное отрицательное магнитосопротивление из-за двумерной слабой локализации внутри жгута. Напротив, для параллельного поля наблюдается сложное колебательное поведение, обусловленное эффектом Альтшулера-Аронова-Спивака вокруг замкнутых электронных траекторий на дискретных цилиндрах внутри жгута из одностенных углеродных нанотрубок. Можно определить доминирующую колебательную моду, которая соответствует замкнутым траекториям вокруг внешней окружности жгута из одностенных углеродных нанотрубок. Однако из-за сложного волокнистого характера жгута общее колебательное поведение довольно сложно и может быть классифицировано как универсальные флуктуации проводимости. При приложении к образцу напряжения задней поверхности наблюдаются пики кулоновской блокады в транспортном токе с дополнительной структурой пиков, наложенной вследствие резонансного туннелирования. Найден интересный эффект, благодаря которому эти пики подавляются в присутствии магнитного поля.

В статье [9] разработана теоретическая модель для высокопроизводительной характеристики отдельных углеродных нанотрубок, учитывающая деполяризацию установки и оптический отклик подложки. Показано, что для правильного моделирования экспериментальных данных необходимо учитывать как некогерентную, так и когерентную деполяризацию света оптическими элементами. Показано, как сигнал нанотрубки можно отделить от комплексного коэффициента отражения антиотражающей подложки, который обычно используется для усиления оптического контраста. Описан экспери-

ментальный протокол для извлечения параметров деполяризации и восприимчивости комплексных нанотрубок, и как он может улучшить назначение хиральности отдельных углеродных нанотрубок в сложных случаях.

Благодаря уникальным физическим и химическим свойствам многостенных углеродных нанотрубок, двустенных углеродных нанотрубок и одностенных углеродных нанотрубок одностенные углеродные нанотрубки могут найти применение в различных областях, включая наноэлектронные устройства следующего поколения [10]. Электронные свойства одностенных углеродных нанотрубок зависят от их атомной структуры. Из-за отсутствия методологии и контроля нанотрубки, полученные с помощью методов промышленного синтеза, то есть дугового разряда, лазерной абляции и химического осаждения из газовой фазы, как правило, проявляют изменяющиеся и смешанные свойства, что ограничивает их применимость. Несмотря на успехи в области синтеза [11–15] и сортировки одностенных углеродных нанотрубок [16–20] с определёнными атомными структурами, требуются новые методы, позволяющие контролируемую модификацию электронного свойства одностенных углеродных нанотрубок.

Недавние исследования углеродных нанотрубок были направлены на изменение электронных свойств одностенных углеродных нанотрубок путём ковалентной и нековалентной модификации их внешней поверхности, замены атомов углерода чужеродными атомами, интеркалирования пучков и заполнения каналов нанотрубок [21, 22]. Последний способ особенно перспективен, поскольку различные вещества с различными свойствами могут быть заключены в оболочку из одностенных углеродных нанотрубок. Заполнение одностенных углеродных нанотрубок фуллереном C_{60} [23] и $RuCl_3$ [24] впервые было выполнено в 1998 году, и с тех пор эта тема привлекает все большее внимание. Одностенные углеродные нанотрубки были заполнены различными простыми элементными веществами, металлами [25–31] и неметаллами [26, 32], химическими соединениями, галогенидами металлов [33–38], халькогениды металлов [39–43] и оксиды металлов [44, 45], а также молекулы, фуллерены и их производные [46–50] и металлоценов [51, 52].

Газофазный метод позволил заполнить одностенные углеродные нанотрубки ферроценом [53–64], кобальтоценом [65, 66], никелоценом [67–70] и цероценом [71, 72].

Хотя углеродные нанотрубки без какой-либо модификации всё ещё обладают большим потенциалом для многих других применений, было обнаружено, что функционализированные углеродные нанотрубки имеют отличные биомедицинские применения.

Проведёный анализ научной литературы по физическим свойствам углеродных нанотрубок и нанокомпозитов с углеродными нанотрубками, который показал необходимость теоретического и численного исследования физических свойств нанокомпозитов с включениями из углеродных нанотрубок.

Теоретическая модель

Теоретические исследования показали, что оптическая активность углеродных нанотрубок исчезает, если нанотрубки становятся больше. Следовательно, ожидается, что другие физические свойства также зависят от этих параметров. Использование оптической активности может привести к созданию оптических устройств, в которых углеродные нанотрубки играют важную роль.

В последние годы полимерные нанокомпозиты вызывают промышленный интерес. Углеродные нанотрубки являются идеальным выбором в качестве наполнителя как для структурных, так и для функциональных применений, поскольку углеродные нанотрубки могут привести к значительному улучшению свойств полимеров при очень низкой загрузке наполнителя. Существуют различные методы изготовления полимерных нанокомпозитов, армированных углеродными нанотрубками, такие как смешивание растворов, смешивание в расплаве и полимеризация. Развиваются также некоторые новые

методы, такие как послойные и листовые маршруты, чтобы дать новое представление о производстве полимерных нанокомпозитов. Электрические, механические и термические свойства углеродных нанотрубок, армированных полимерными нанокомпозитами, представляют значительный технологический интерес. Потенциальные применения высокоэффективных углеродных нанотрубок на полимерных нанокомпозитах обеспечат прогресс в этой новой области.

Полимер является универсальным материалом, обладающим уникальными физическими свойствами, такими как низкая плотность, разумная прочность, гибкость, лёгкость в обработке. Однако механические свойства этих материалов не подходят для многих инженерных применений. Следовательно, существует постоянный поиск новых полимерных материалов с улучшенными свойствами. Первоначально смешивание различных классов полимеров было использовано для изготовления новых материалов с уникальными свойствами. Однако смешивание приводит лишь к незначительному улучшению физических свойств, которые всё ещё недостаточны для инженерных приложений. Поэтому для повышения прочности и жёсткости полимерных материалов использовались различные виды органических и неорганических наполнителей. Было отмечено, что прочность и жёсткость длинных волокон, армированных термореактивным полимером, сравнима с металлами по доле их массы. В результате чего эти материалы были использованы в авиационной и спортивной технике. Однако обработка этих материалов очень сложна; поэтому были разработаны небольшие композиты, армированные волокнами или частицами. В качестве наполнителей для обычных частиц использовались кремнезем, сажа, металлические частицы. Но для достижения желаемых механических свойств требовалась значительно большая загрузка наполнителя, что, таким образом, увеличивало стоимость и затрудняло технологичность. Поэтому для достижения высоких механических свойств при более низкой загрузке наполнителя использовались нанонаполнители. Укреплённая нанонаполнителем полимерная матрица известна как полимерный нанокомпозит.

Поляризационная оптическая микроскопия и спектроскопия постепенно становятся ключевыми методами высокопроизводительной характеристики отдельных углеродных нанотрубок и других одномерных наноструктур на подложке и в устройствах. Оптический отклик углеродных нанотрубок на подложке в экспериментах с кроссполяризацией обычно ограничивается сохранением поляризации оптических элементов в экспериментальной установке.

Одним из наиболее интересных аспектов одностенных углеродных нанотрубок является крайняя зависимость их свойств от их кристаллической структуры и окружающей среды. Тем не менее, эта замечательная особенность является двусторонней монетой: она открывает множество новых явлений и приложений [73, 74], но проблематична, когда требуются специфические и хорошо контролируемые свойства, как для электронных приложений [75]. Эта проблема становится ещё более острой, когда речь идёт об отдельных одностенных углеродных нанотрубках, поскольку измерение их структуры или сигнатуры, зависящие от окружающей среды, обычно является длительным и сложным, особенно при изучении в устройствах [76–79]. Как прямой метод структурной характеристики, электронная дифракция должна быть методом выбора для определения структуры отдельных нанотрубок [80], но строго ограничена требованием использования взвешенных одностенных углеродных нанотрубок, а также стоимостью и сложностью передачи. электронные микроскопы. На практике рамановская спектроскопия является наиболее популярным методом [81], потому что он прост в исполнении, подходит как для металлических, так и для полупроводниковых одностенных углеродных нанотрубок, обеспечивает богатые информацией спектры и широко доступен. Однако основным недостатком является метод проб и ошибок, необходимый для опре-

деления энергии лазера в резонансе с оптическим переходом исследуемой нанотрубки. Измеряя энергии оптических переходов отдельных одностенных углеродных нанотрубок, резонансное рэлеевское рассеяние представляет собой высокопроизводительный метод структурной идентификации [82], но обычно ограничивается подвесными нанотрубками из-за интенсивного отражения или рассеяния от подложки. Недавно были разработаны новые оптические методы для непосредственного измерения оптических характеристик отдельных нанотрубок непосредственно на подложках [83–85]. Среди них поляризованная оптическая спектроскопия [86–88] представляет особый интерес, поскольку она не накладывает дополнительных ограничений (например, осаждённый слой, жидкая среда) на образец.

Сначала рассмотрим идеальный случай, когда оптические элементы не деполяризуют свет. Внешнее поле $\mathbf{E}_i$ можно записать в виде

$$\mathbf{E}_i = |E_0| \exp(ikz - i\phi)\, \mathbf{e}_x \ , \tag{1}$$

где $|E_0|$ – амплитуда падающего поля, z – координата вдоль оси распространения $\mathbf{e}_x$, k – волновое число, а ϕ – фаза Гуи [89], дополнительная фаза, возникающая при распространении сфокусированного гауссова пучка.

Поэтому в следующем выражении рассмотрим только фазу Гуи для простоты. Отражённый луч сохраняет поляризацию падающего луча и следует за этим выражением:

$$\mathbf{E}_R = r\mathbf{E}_i \exp(i\phi) = r\,|E_0| \exp(i\pi)\, \mathbf{e}_x \ , \tag{2}$$

где r – амплитудный коэффициент отражения (r^2 – коэффициент отражения). Здесь фаза Гуи для отраженного пучка принимается равной π, поскольку обнаружение выполняется в дальней зоне. Поле, рассеянное углеродной нанотрубкой, считается полностью переполяризованным вдоль оси углеродной нанотрубки и записывается в виде

$$\mathbf{E}_{NT} = \frac{1}{2} A\,(1+r)^2\, \mathbf{E}_0 \exp(i\phi)\,(\mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y) \ , \tag{3}$$

где A – комплексная постоянная, которая пропорциональна восприимчивости нанотрубок χ и зависит от геометрических параметров (например, положения углеродных нанотрубок в освещённой области или эффективности сбора). Коэффициент $(1+r)$ обозначает тот факт, что нанотрубка видит как падающий, так и отражённый свет. Этот коэффициент возводится в квадрат, потому что этот эффект действует как на поглощение, так и на рассеяние. Рассеянный свет от углеродных нанотрубок не приобретает дополнительную фазу при движении в дальнем поле. Оба поля собираются объективом микроскопа и анализируются через второй поляризатор. Интенсивность I, которую измеряют на камере или спектрометре, определяется выражением

$$I = |E_{tot}| = |(\mathbf{E}_R + \mathbf{E}_{NT})\,(\sin(\delta)\,\mathbf{e}_x + \cos(\delta)\,\mathbf{e}_y)|^2 \ , \tag{4}$$

где оба поля суммируются и проецируются на основную ось второго поляризатора, которая составляет небольшой угол δ с её направлением.

Эта интенсивность сравнивается с эталонной интенсивностью I_0, отражённой подложкой от углеродных нанотрубок:

$$I_0 = |\mathbf{E}_R\,(\sin(\delta)\,\mathbf{e}_x + \cos(\delta)\,\mathbf{e}_y)|^2 \ . \tag{5}$$

Контраст между двумя сигналами определяется выражением:

$$C = \frac{I - I_0}{I_0} \approx \frac{(1+r)^4\,|A|^2}{4r^2\delta^2} + \frac{(1+r)^2\,\mathrm{Re}\left(\exp(i\,(\pi-\phi))\,A^*\right)}{r\delta} \ . \tag{6}$$

Первый член этого уравнения связан с рассеянием и показывает, что будет измерено в эксперименте по рассеянию Рэлея. Второе слагаемое описывает интерференцию между отражённым полем и рассеянным полем углеродных нанотрубок.

Часть входного света, которая деполяризована вдоль оси $\mathbf{e}_x$ (соответственно, оси $\mathbf{e}_y$), называется f_x (соответственно, f_y) и считается намного меньшей, чем 1. Для описания некогерентной деполяризации можно написать

$$\mathbf{E}_i = |E_i| \left(a\mathbf{e}_x + f_x \exp\left(i\psi_x\left(t\right)\right)\mathbf{e}_x + f_y \exp\left(i\psi_y\left(t\right)\right)\right)\mathbf{e}_y \tag{7}$$

с $\psi_x\left(t\right)$ и $\psi_y\left(t\right)$ случайные фазы деполяризованного света. Коэффициенты a, f_x и f_y следуют нормировочному уравнению

$$\left|a + f_x \exp\left(i\psi_x\left(t\right)\right)\right|^2 + \left|f_y \exp\left(i\psi_y\left(t\right)\right)\right|^2 = 1 \ .$$

Выражение контраста теперь даётся выражением

$$C \approx \frac{\left(1+r\right)^4 |A|^2}{4r^2\left(\delta^2 + f_y^2\right)} + \frac{\delta\left(1+r\right)^2 \mathrm{Re}\left(\exp\left(i\left(\pi-\phi\right)\right)A^*\right)}{r\left(\delta^2+f_y^2\right)} \ . \tag{8}$$

Можно отметить, что при добавлении деполяризации выражение (8) больше не расходится при $\delta \to 0$. В частном случае, когда $\phi = \pi/2$, это выражение можно упростить до записи

$$C \approx \frac{\left(1+r\right)^4 |A|^2}{4r^2\left(\delta^2 + f_y^2\right)} + \frac{\delta\left(1+r\right)^2 \mathrm{Im}\left(A\right)}{r\left(\delta^2+f_y^2\right)} \ . \tag{9}$$

Это выражение показывает, что некогерентная деполяризация не меняет характер контраста. Другими словами, форма спектров не изменится. Поэтому необходимо учитывать другой тип деполяризации для учёта периодических колебаний, наблюдаемых при малых значениях δ.

Здесь считаем, что оптические элементы действуют как волновая пластина, которая меняет линейную поляризацию на эллиптическую с фиксированной фазой между двумя ортогональными компонентами. Часть поля ввода, которая деполяризована, называется f_{co}, и предполагается, что она намного меньше 1. Внешнее поле теперь записывается как

$$\mathbf{E}_i = |E_i| \exp\left(i\phi\right)\left(\mathbf{e}_x + f_{co}\exp\left(i\psi\right)\mathbf{e}_y\right) \ , \tag{10}$$

где ψ – фаза деполяризованного света. Здесь, в отличие от предыдущего случая, когерентно деполяризованный свет может мешать входной поляризации при взаимодействии с углеродными нанотрубками, ориентированными под углом 45°. Затем контраст определяется как

$$C = \frac{\left(1+r\right)^4 |A|^2}{4r^2\left|\delta + f_{co}\exp\left(i\psi\right)\right|} + \frac{\left(1+r\right)^2 \mathrm{Re}\left(\exp\left(i\left(\pi-\phi\right)\right)A^*\left(\delta + f_{co}\exp\left(i\psi\right)\right)\right)}{r\left|\delta + f_{co}\exp\left(i\psi\right)\right|^2} \ . \tag{11}$$

Рассматривая конкретный случай, когда $\phi = \pi/2$, можно заметить, что теперь A связан с комплексным членом деполяризации, как можно видеть в числителе интерференционного члена. Полное выражение может быть явно записано как

$$C = \frac{\left(1+r\right)^4 |A|^2}{4r^2\left|\delta + f_{co}\exp\left(i\psi\right)\right|^2} + \left(1+r\right)^2 \frac{\left(\delta + f_{co}\exp\left(i\psi\right)\right)\mathrm{Im}\left(A\right) - f_{co}\sin\psi\,\mathrm{Re}\left(A\right)}{r\left|\delta + f_{co}\exp\left(i\psi\right)\right|^2} \ . \tag{12}$$

Числитель интерференционного члена теперь состоит из двух вкладов. Первый вклад включает поглощение нанотрубок и больше не уничтожается при $\delta = 0$, но при $\delta =$

$-f_{co}\cos\psi$, который в дальнейшем будет называться δ_0. Второй вклад связан с $\mathrm{Re}\,(A)$, который сам связан с $\mathrm{Im}\,(A)$ через отношения Крамерса-Кронига:

$$\mathrm{Re}\,(\chi\,(\omega)) = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty \frac{\omega'\,\mathrm{Im}\,(\chi\omega')}{\omega'^2-\omega^2}d\omega'\ , \tag{13}$$

где ω – энергия. Второе слагаемое в выражении C может кардинально изменить форму спектра контраста, при условии, что $\sin\psi$ сравним с $\cos\psi$. Давайте определим $f = -f_{co}\sin\psi$ и выражение можно записать в виде

$$C = \frac{(1+r)^4\,|A|^2}{4r^2\,|\delta-\delta_0+if|^2} + (1+r)^2\,\frac{(\delta-\delta_0)\,\mathrm{Im}\,(A) - f\,\mathrm{Re}\,(A)}{r\,|\delta-\delta_0+if|^2}\ . \tag{14}$$

Это выражение показывает, что в конкретном случае, когда $f = 0$, то есть $\psi = 0$ (или π), контраст расходится при $\delta = \delta_0$: две компоненты поляризации находятся в фазе (или в противофазе), и в результате поляризация линейная. Другими словами, чтобы полностью смоделировать физику, лежащую в основе спектра контраста, необходимо принять во внимание оба типа деполяризации, когерентную и некогерентную, и тогда наиболее общее выражение контраста даётся выражением

$$C = \frac{(1+r)^4\,|A|^2}{4r^2\,|\delta-\delta_0+if|^2+f_y^2} + (1+r)^2\,\frac{(\delta-\delta_0)\,\mathrm{Im}\,(A) - f\,\mathrm{Re}\,(A)}{r\,|\delta-\delta_0+if|^2+f_y^2}\ . \tag{15}$$

Это выражение показывает важность знания типа деполяризации, участвующей в эксперименте, поскольку числитель и знаменатель не имеют общих факторов. Это также показывает, что как некогерентная, так и когерентная деполяризация будут иметь связанный эффект (в знаменателе) и не могут быть легко разделены, если оба произойдут в эксперименте.

Интерференция в оксидном слое является хорошо известным явлением, которое приводит к тому, что два коэффициента отражения становятся сложными функциями длины волны:

$$r_E\,(\lambda) = -\frac{r_{01}+r_{12}\exp\,(i2k_0n_1d_1)}{1+r_{01}r_{12}\exp\,(i2k_0n_1d_1)} \tag{16}$$

$$r_A\,(\lambda) = 1-\frac{(1-r_{01}^2)\,r_{12}\exp\,(i2k_0n_1d_1)}{1+r_{01}r_{12}\exp\,(i2k_0n_1d_1)}\ , \tag{17}$$

где r_{01} (соответственно, r_{12}) – коэффициент отражения на границе раздела воздуха с оксидом кремния толщиной d с показателем преломления n_1 (соответственно на границе оксида кремния и кремния), а $k_0 = 2\pi/\lambda$.

Расчёт контраста в идеальном случае без деполяризации даёт новое выражение:

$$C = \frac{|A|^2\,|r_A|^4}{4r_E^2\delta^2} + \frac{\mathrm{Re}\left(\exp\,(i\,(\pi-\phi))\,A^*\,(r_A^*)^2\,r_E\right)}{|r_E|^2\,\delta}\ , \tag{18}$$

где видно, что коэффициент усиления появляется только в числителе. В целях иллюстрации добавим четыре экситонных перехода углеродных нанотрубок одинаковой силы при разных энергиях вместе с нерезонансным членом восприимчивости (то есть комплексной постоянной A_0):

$$A\,(\lambda) = \frac{C_0}{(\omega_0-\omega)-i\frac{\Gamma}{2}} + A_0\ . \tag{19}$$

Принимая во внимание влияние подложки и обоих типов деполяризации, контраст записывается как

$$C = \frac{|A|^2 |r_A|^4}{4r_E^2 \left(|\delta - \delta_0 + if|^2 + f_y^2\right)} + \frac{\mathrm{Re}\left(\exp\left(i\left(\pi - \phi\right)\right) A^* \left(r_A^*\right)^2 r_E\right)\left(\delta - \delta_0 + if\right)}{r_E^2 \left(|\delta - \delta_0 + if|^2 + f_y^2\right)}\ , \qquad (20)$$

Из этого выражения можно выбрать использование различных моделей, представленных ранее. Например, установка $f = 0$ эквивалентна полностью некогерентной деполяризации. Хотя в этом выражении представлено много параметров, в следующей части можно увидеть, что некоторые из них можно исправить или получить с помощью независимых измерений. Уравнение (20) также подчеркивает важность фазы Гуи, которая действует как дополнительная дефазировка в члене помехи. Фаза Гуи обычно считается равной $\pi/2$, но следует отметить, что отклонения могут наблюдаться, если нанотрубка не находится в центре перетяжки пучка или если пучок не является полностью гауссовским.

Показатель преломления для многослойных углеродных нанотрубок может быть рассчитан по формуле $n_{MWCNTs} = 2.47 + i0.99$. Формула показателя для преломления многослойных углеродных нанотрубок с учётом дисперсии не известна в настоящее время.

Рассмотрим коэффициенты Френеля для границы раздела сред с нанокомпозитной средой с наноразмерными включениями из углеродных наноматериалов. Теория оптических свойств границы раздела сред с нанокомпозитной средой с наноразмерными включениями из углеродных наноматериалов будет строиться на основе приближения эффективной среды. На первом этапе теории будут вычисляться амплитудные и энергетические коэффициенты Френеля для границы раздела сред с нанокомпозитной средой с включениями из углеродных наноматериалов. На втором этапе теории будут вычисляться амплитудные и энергетические коэффициенты Френеля для нанокомпозитной плёнки с наноразмерными включениями из углеродных наноматериалов. На втором этапе теории будут вычисляться амплитудные и энергетические коэффициенты Френеля для нанокомпозитной плёнки с наноразмерными включениями из углеродных наноматериалов в определённом интервале оптических длин волн. Пусть на границу раздела сред 0 и 1 падает внешняя оптическая волна. Угол падения оптической волны обозначим θ_0, а угол преломления обозначим θ_1.

Напряжённость электрического поля внешней электромагнитной волны имеет вид представим в виде плоской волны. Будем использовать комплексное представление для записи векторов напряжённостей внешней, отражённой и прошедшей через границу раздела сред волн:

$$\mathbf{E}_{in}\left(\mathbf{r}, t\right) = \mathbf{E}_{in}\left(0\right)\exp\{\left(i\left(\omega t - \mathbf{k}_{in}\mathbf{r}\right)\right)\}\ , \qquad (21)$$

$$\mathbf{E}_{r}\left(\mathbf{r}, t\right) = \mathbf{E}_{r}\left(0\right)\exp\{\left(i\left(\omega t - \mathbf{k}_{r}\mathbf{r}\right)\right)\}\ , \qquad (22)$$

$$\mathbf{E}_{t}\left(\mathbf{r}, t\right) = \mathbf{E}_{t}\left(0\right)\exp\{\left(i\left(\omega t - \mathbf{k}_{t}\mathbf{r}\right)\right)\}\ , \qquad (23)$$

где амплитуды напряжённостей для случая s-поляризации и p-поляризации излучения определяются выражениями:

$$\mathbf{E}_{r}^{s}\left(0\right) = r^{s}\mathbf{E}_{in}\left(0\right)\ , \qquad (24)$$

$$\mathbf{E}_{t}^{s}\left(0\right) = t^{s}\mathbf{E}_{in}\left(0\right)\ , \qquad (25)$$

$$\mathbf{E}_{r}^{p}\left(0\right) = r^{p}\mathbf{E}_{in}\left(0\right)\ , \qquad (26)$$

$$\mathbf{E}_{t}^{p}\left(0\right) = t^{p}\mathbf{E}_{in}\left(0\right)\ , \qquad (27)$$

где r^s, t^s, r^p и t^p являются амплитудными коэффициентами Френеля для s-компонент и p-компонент отражённой и прошедшей волн.

В случае прозрачных сред амплитудные коэффициенты Френеля принимают вид:

$$r_{01}^{s} = \frac{\operatorname{tg}(\theta_0 - \theta_1)}{\operatorname{tg}(\theta_0 + \theta_1)} , \tag{28}$$

$$t_{01}^{s} = \frac{2\sin\theta_1 \cos\theta_0}{\sin(\theta_0 + \theta_1)} , \tag{29}$$

$$r_{01}^{p} = \frac{\operatorname{tg}(\theta_0 - \theta_1)}{\operatorname{tg}(\theta_0 + \theta_1)} , \tag{30}$$

$$t_{01}^{p} = \frac{2n_0/\cos\theta_1}{n_1/\cos\theta_1 + n_0/\cos\theta_0} . \tag{31}$$

Мы получим энергетические коэффициенты

$$R_{0,1}^{s,p} = \left|r_{0,1}^{s,p}\right|^2 , \tag{32}$$

$$T_{0,1}^{s,p} = \frac{n_1\cos\theta_1}{n_0\cos\theta_0}\left|t_{0,1}^{s,p}\right|^2 . \tag{33}$$

Для энергетических коэффициентов выполняется закон сохранения

$$R_{0,1}^{s,p} + T_{0,1}^{s,p} = 1 . \tag{34}$$

Амплитудные коэффициенты Френеля для нанокомпозитной плёнки могут быть записаны в точной форме, как

$$r_1^{s} = \frac{E_r^{s}(0)}{E_{in}^{s}(0)} = \frac{r_{01}^{s} + r_{12}^{s}\exp(i2\phi_1)}{1 + r_{01}^{s}r_{12}^{s}\exp(i2\phi_1)} , \tag{35}$$

$$r_1^{p} = \frac{E_r^{p}(0)}{E_{in}^{p}(0)} = \frac{r_{01}^{p} + r_{12}^{p}\exp(i2\phi_1)}{1 + r_{01}^{p}r_{12}^{p}\exp(i2\phi_1)} , \tag{36}$$

где введена фазовая толщина слоя

$$\phi_1 = k_0 d_1 \sqrt{\varepsilon_1 - \varepsilon_0 \sin^2\theta_0} , \tag{37}$$

где волновое число $k_0 = 2\pi/\lambda$.

Коэффициенты Френеля для прошедшей оптической волны определяются выражениями:

$$t_1^{s} = \frac{E_t^{s}(0)}{E_{in}^{s}(0)} = \frac{t_{01}^{s}t_{12}^{s}\exp(i\phi_1)}{1 + r_{01}^{s}r_{12}^{s}\exp(i2\phi_1)} , \tag{38}$$

$$t_1^{p} = \frac{E_t^{p}(0)}{E_{in}^{p}(0)} = \frac{t_{01}^{p}t_{12}^{p}\exp(i\phi_1)}{1 + r_{01}^{p}r_{12}^{p}\exp(i2\phi_1)} . \tag{39}$$

Разработка компьютерной программы и результаты численных расчётов оптических характеристик нанокомпозитной среды с углеродными нанотрубками

В теоретической части работы в качестве основных начальных параметров выбираются следующие параметры: угол падения внешнего излучения, диапазон длин волн излучения для построения спектров отражения и пропускания, характерные размеры включений, набор собственных частот системы.

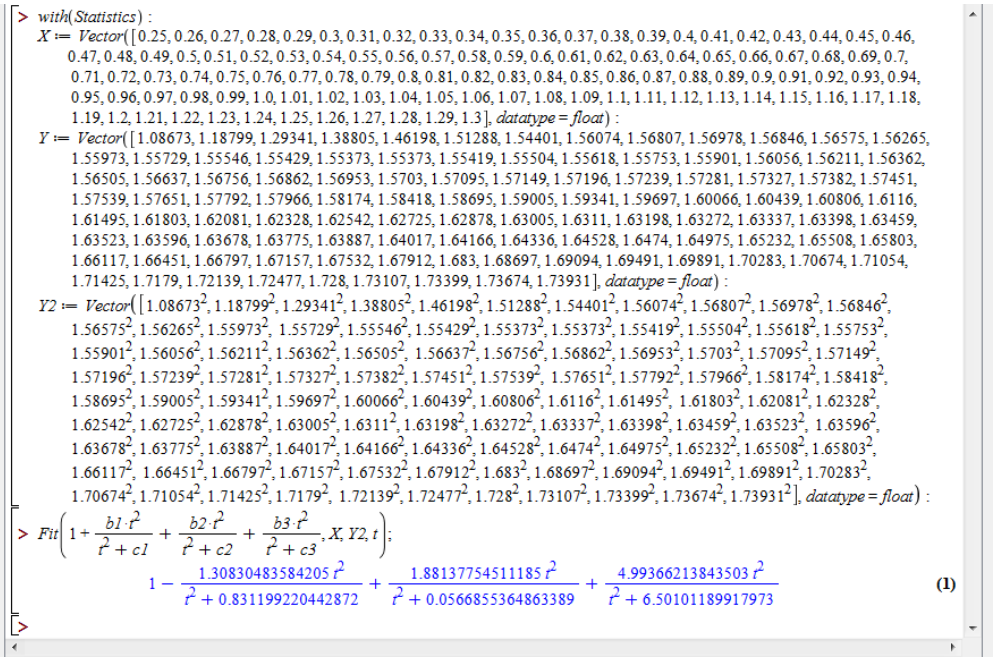


Рис. 1. Часть компьютерной программы для аппроксимации действительной части показателя преломления углеродных нанотрубок как функции длины волны оптического излучения.

Нанокомпозиты на основе полимерных матриц и нанотрубок способны изменять свою электрическую проводимость за счёт смещения нанотрубок относительно друг друга под влиянием внешних факторов. Это свойство можно применить для создания микроскопических сенсоров, определяющих интенсивность механического воздействия за сверхкороткие промежутки времени.

Опишем основные элементы компьютерной программы для расчёта физических характеристик нанокомпозитных систем с углеродными нанотрубками.

На рис. 1 изображена часть компьютерной программы для аппроксимации действительной части показателя преломления углеродных нанотрубок как функции длины волны оптического излучения.

На рис. 2 изображена часть компьютерной программы для аппроксимации мнимой части показателя преломления углеродных нанотрубок как функции длины волны оптического излучения.

Основной расчетный блок разрабатываемой программы начинается с описания функций, характеризующих дисперсионных зависимостей диэлектрической проницаемости, магнитной проницаемости и комплексного показателя преломления для различных материалов. Ключевую часть программы составляют различные формулы смешения, позволяющие рассчитывать эффективные параметры нанокомпозитов с нанотрубками. В ходе работы будут подвергнуты анализу и запрограммированы функциональные зависимости эффективных параметров таких, как эффективная диэлектрическая проницаемость, эффективная магнитная проницаемость, эффективный показатель преломления и эффективный поверхностный импеданс нанокомпозитной среды с нанотрубками, находящейся во внешнем поле оптического излучения.

Эффективный показатель преломления и эффективная диэлектрическая проницаемость нанокомпозитной среды с нанотрубками могут быть рассчитаны в приближении эффективной среды либо по формуле Максвелл-Гарнетта, либо по формуле Бруггемана, либо по формуле Лорентц-Лоренца.

Следующая часть программы позволяет рассчитывать амплитудные энергетические

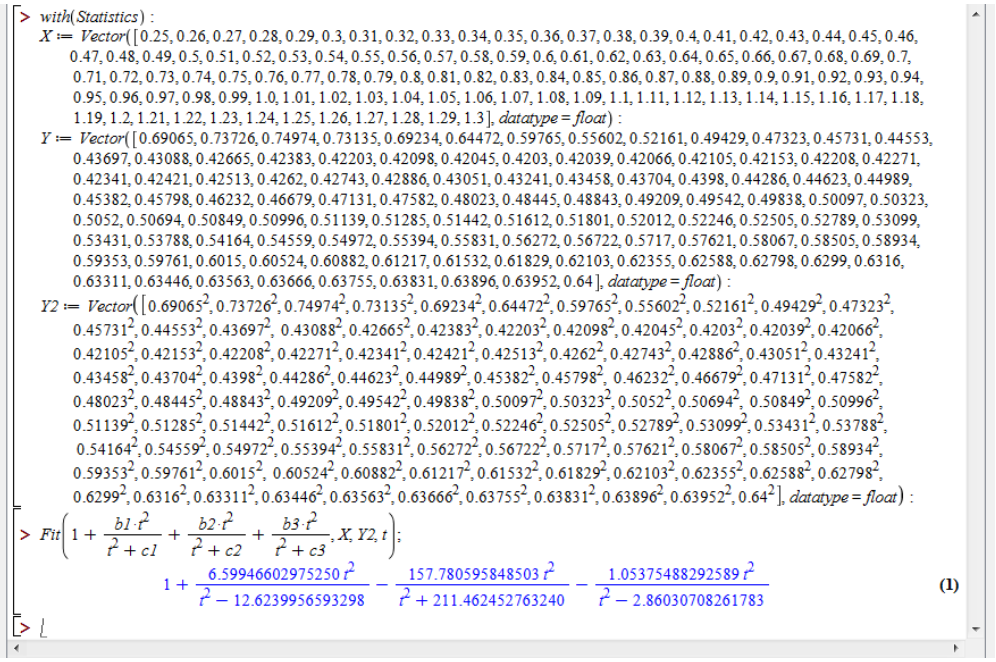


Рис. 2. Часть компьютерной программы для аппроксимации мнимой части показателя преломления углеродных нанотрубок как функции длины волны оптического излучения.

коэффициенты оптического отражения, пропускания, поглощения для различных конфигураций наноструктур с нанотрубками как функции длины волны излучения. На основании проведённых расчётов набора эффективных параметров можно получить зависимости энергетических коэффициентов оптического отражения, пропускания, поглощения как функции длины волны излучения.

Заключительная же часть программы формирует графики энергетических коэффициентов оптического отражения, пропускания, поглощения как функции длины волны излучения.

Построенные графические зависимости будут способствовать наглядному представлению оптических характеристик наноструктурных материалов с нанотрубками.

Приведём краткое описание созданного программного продукта, предназначенного для расчёта физических свойств нанокомпозитных систем с нанотрубками.

Применим модель эффективной среды для описания нанокомпозитных сред с включениями в виде углеродных нанотрубок. Эффективная диэлектрическая проницаемость нанокомпозитной среды j с включениями в виде углеродных нанотрубок вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_j = \varepsilon_j^m \left(1 + \frac{f_j \left(\varepsilon_j^p - \varepsilon_j^m \right)}{\varepsilon_j^m + g_j \left(1 - f_j \right) \left(\varepsilon_j^p - \varepsilon_j^m \right)} \right) . \tag{40}$$

где ε_j^m — диэлектрическая проницаемость матрицы в нанокомпозитной среде j, ε_j^p — диэлектрическая проницаемость системы наноразмерных включений в виде углеродных нанотрубок в нанокомпозитной среде j, f_j — объёмная доля наноразмерных включений в нанокомпозитной среде j, g_j — деполяризующий фактор.

На рис. 3 изображена часть компьютерной программы на языке программирования Python для расчёта физических свойств нанокомпозитных систем с углеродными нанотрубками.

Опишем результаты численных расчётов оптического пропускания однослойной нанокомпозитной плёнки с углеродными нанотрубками, полученные в результате вычислений при помощи компьютерной программы на языке программирования Python.

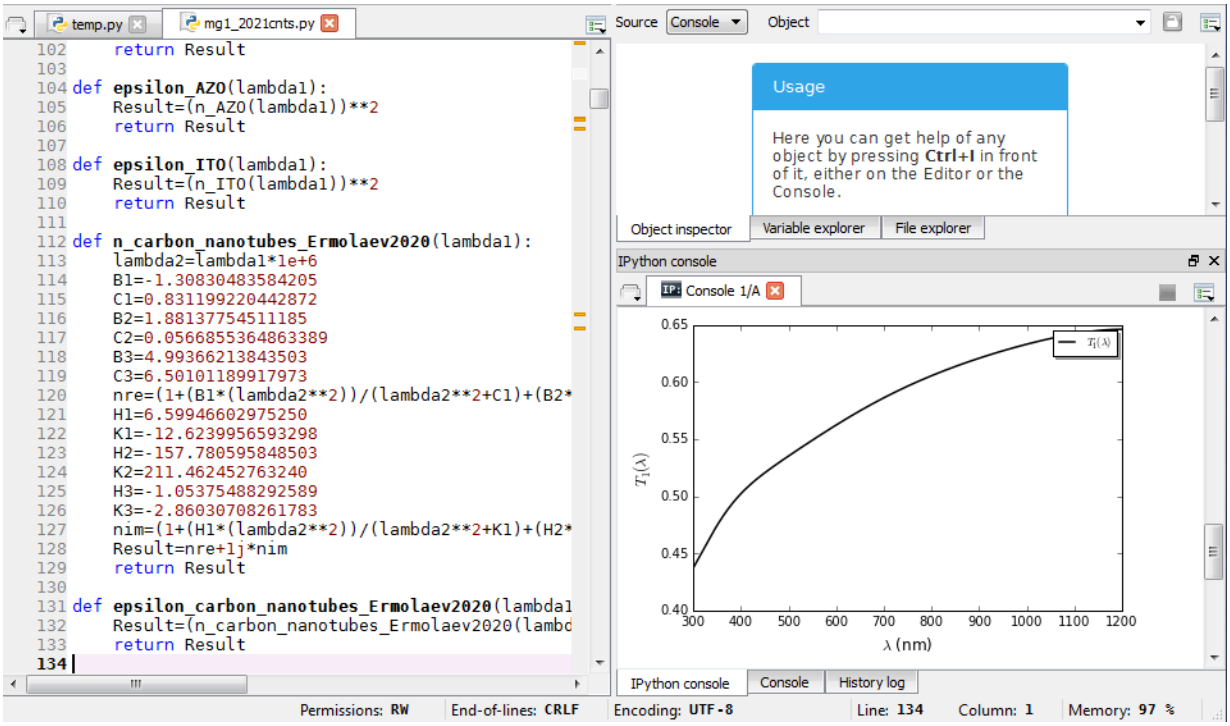
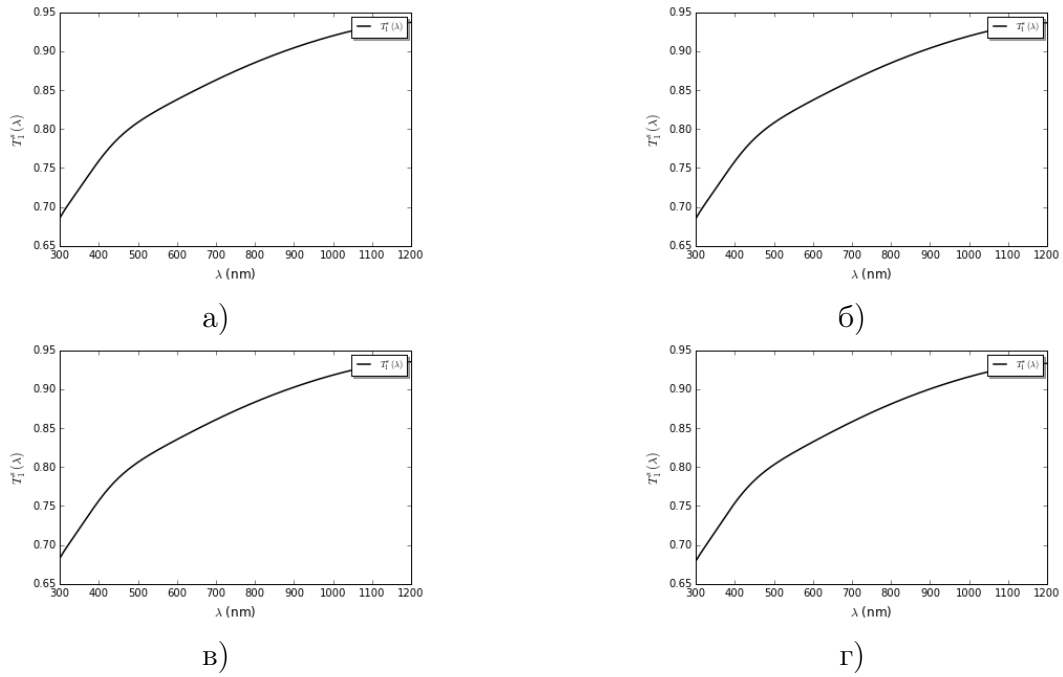


Рис. 3. Часть компьютерной программы на языке программирования Python для расчёта физических свойств нанокомпозитных систем с углеродными нанотрубками.

Рассмотрим результаты численных расчётов оптического пропускания однослойной нанокомпозитной плёнки с углеродными нанотрубками, расположенной на подложке из стекла ВК7.



а) б) в) г)

Рис. 4. Зависимость энергетического коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения s-поляризованной оптической волны из воздуха на нанокомпозитную плёнку толщиной $d_1 = 250$ нм из полиметилметакрилата с углеродными нанотрубками, фактором заполнения $f_1 = 3\,\%$, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения а) $\theta_0 = 0^\circ$, б) $\theta_0 = 5^\circ$, в) $\theta_0 = 10^\circ$, г) $\theta_0 = 15^\circ$.

На рис. 4 изображена зависимость энергетического коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения s-поляризованной оптической волны из воздуха на нанокомпозитную плёнку толщиной $d_1 = 250$ нм из полиметилметакрилата с углеродными нанотрубками, фактором заполнения $f_1 = 3\,\%$, расположенную на подложке из стекла BK7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 0^\circ$, б) $\theta_0 = 5^\circ$, в) $\theta_0 = 10^\circ$, г) $\theta_0 = 15^\circ$. Из графиков видно, что нанокомпозитная плёнка обладает высоким пропусканием в широком диапазоне оптических длин волн.

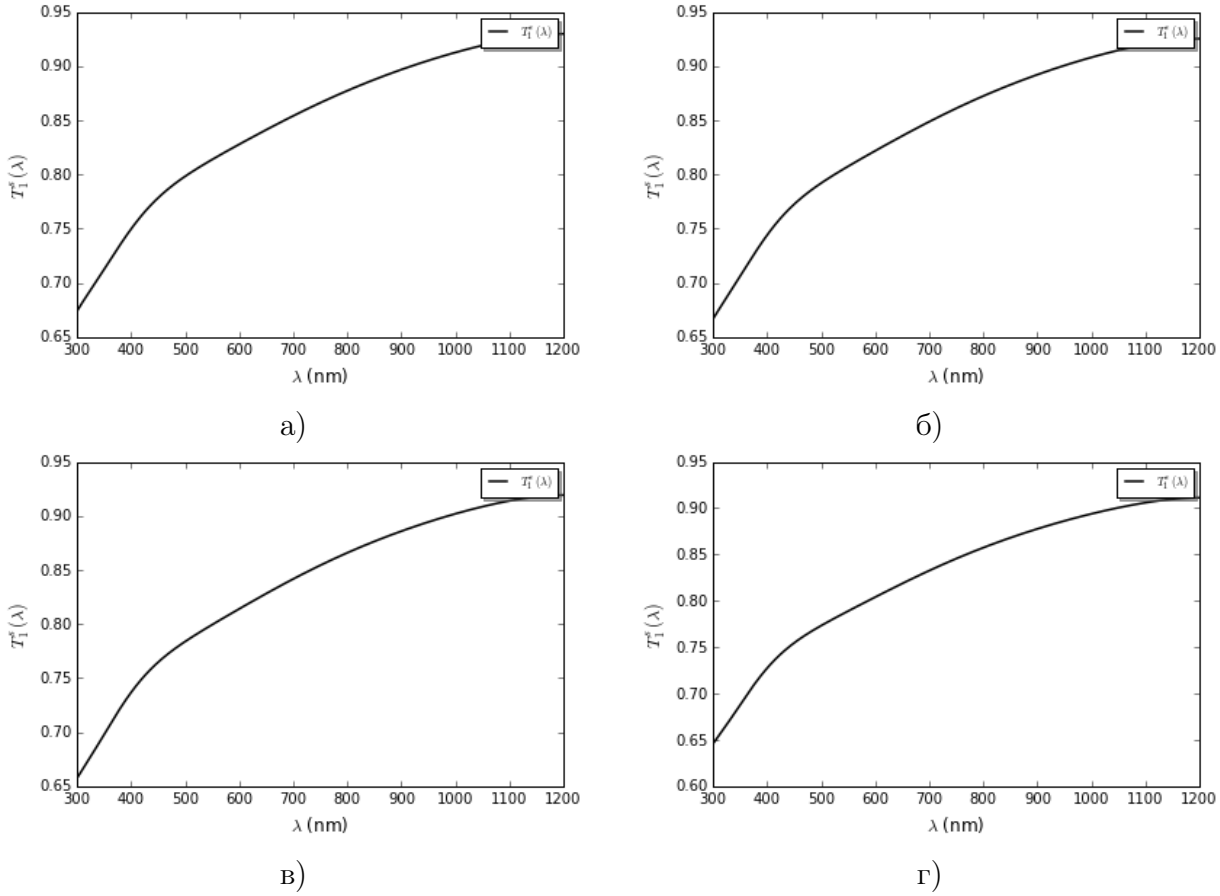


Рис. 5. Зависимость энергетического коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения s-поляризованной оптической волны из воздуха на нанокомпозитную плёнку толщиной $d_1 = 250$ нм из полиметилметакрилата с углеродными нанотрубками, фактором заполнения $f_1 = 3\,\%$, расположенную на подложке из стекла BK7 при угле падения а) $\theta_0 = 20^\circ$, б) $\theta_0 = 25^\circ$, в) $\theta_0 = 30^\circ$, г) $\theta_0 = 35^\circ$.

На рис. 5 изображена зависимость энергетического коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения s-поляризованной оптической волны из воздуха на нанокомпозитную плёнку толщиной $d_1 = 250$ нм из полиметилметакрилата с углеродными нанотрубками, фактором заполнения $f_1 = 3\,\%$, расположенную на подложке из стекла BK7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 20^\circ$, б) $\theta_0 = 25^\circ$, в) $\theta_0 = 30^\circ$, г) $\theta_0 = 35^\circ$.

Заключение

Даже после более чем двух десятилетий всесторонних фундаментальных исследований с момента их открытия углеродные нанотрубки продолжают удивлять исследователей потенциальными новыми приложениями и интересными открытиями новых физических явлений и свойств. Из-за огромного стремления найти практическое при-

менение, исследования углеродных нанотрубок активно проводятся в различных областях, включая накопление энергии, молекулярную электронику, наномеханические устройства, композиты, а также химическое сенсирование и биосенсирование.

В современной технологии материалов углеродные нанотрубки стали кандидатами для изготовления новых устройств и систем доставки лекарств. Они были успешно реализованы для разработки новых систем доставки лекарств. Углеродные нанотрубки демонстрируют многочисленные возможности в областях применения, таких как терапия, биомедицинские применения, инженерия костной ткани. Кроме того, некоторые стратегии химической модификации углеродных нанотрубок также обсуждались с точки зрения ковалентных и нековалентных связей. Углеродные нанотрубки всё ещё обладают большим потенциалом для применения в биомедицинских приложениях благодаря гибкости их модификации, проводимости и эластичности. Из-за таких уникальных свойств углеродные нанотрубки стали интересной областью исследований для разработки новых систем доставки лекарств для лучшего высвобождения терапевтических агентов.

Уникальные свойства углеродных нанотрубок открыли новую эпоху создания современных многофункциональных нанокомпозитов. Включение углеродных нанотрубок в полимерные матрицы дает материалы, которые можно использовать для многих высокопроизводительных инженерных задач. Исследования на основе полимерных нанокомпозитов на основе углеродных нанотрубок показывают, что углеродные нанотрубки имеют большой потенциал для изменения свойств полимерных нанокомпозитов. Качество углеродных нанотрубок, армированных полимерными нанокомпозитами, зависит от нескольких факторов, таких как тип углеродных нанотрубок, хиральность, дисперсия, выравнивание, чистота, соотношение сторон, функционализация и межфазное взаимодействие между углеродными нанотрубками и полимерной матрицей.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. проведённый анализ научной литературы по физическим свойствам нанокомпозитных сред с включениями из углеродных нанотрубок показал необходимость теоретического и численного исследования физических свойств нанокомпозитных сред с включениями из углеродных нанотрубок,
2. построена теоретическая модель оптических процессов в нанокомпозитных структурах с включениями из углеродных нанотрубок,
3. построена численная модель оптических процессов в нанокомпозитных структурах с включениями из углеродных нанотрубок и разработана компьютерная программа на языке программирования Python для вычисления оптических характеристик нанокомпозитной структуры с включениями в виде углеродных нанотрубок,
4. проведённые численные расчёты оптических параметров нанокомпозитной структуры с углеродными нанотрубками показали, что можно существенно увеличить оптическое пропускание при определённых геометрических параметрах нанокомпозитной структуры с углеродными нанотрубками.

В работе модифицирован метод численного расчёта эффективных оптических параметров нанокомпозитных структур с включениями из углеродных нанотрубок.

Список использованных источников

1. Ion irradiation effects on conduction in single-wall carbon nanotube networks / V. Skákalová [et al.] // Applied Physics A. — 2008. — jan. — Vol. 90, no. 4. — P. 597–602. — URL: https://doi.org/10.1007/s00339-007-4383-0.

2. Yosida Y., Oguro I. Variable range hopping conduction in bulk samples composed of single-walled carbon nanotubes // Journal of Applied Physics. — 1999. — jul. — Vol. 86, no. 2. — P. 999–1003. — URL: https://doi.org/10.1063/1.370838.

3. Magnetoresistance of an entangled single-wall carbon-nanotube network / G. T. Kim [et al.] // Physical Review B. — 1998. — dec. — Vol. 58, no. 24. — P. 16064–16069. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.58.16064.

4. Takano Takumi, Takenobu Taishi, Iwasa Yoshihiro. Enhancement of Carrier Hopping by Doping in Single Walled Carbon Nanotube Films // Journal of the Physical Society of Japan. — 2008. — dec. — Vol. 77, no. 12. — P. 124709. — URL: https://doi.org/10.1143/jpsj.77.124709.

5. Quantum Transport in a Multiwalled Carbon Nanotube / L. Langer [et al.] // Physical Review Letters. — 1996. — jan. — Vol. 76, no. 3. — P. 479–482. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.76.479.

6. Vavro J., Kikkawa J. M., Fischer J. E. Metal-insulator transition in doped single-wall carbon nanotubes // Physical Review B. — 2005. — apr. — Vol. 71, no. 15. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.71.155410.

7. Variable Range Hopping in Single-Wall Carbon Nanotube Thin Films: A Processing–Structure–Property Relationship Study / Sida Luo [et al.] // Langmuir. — 2013. — jun. — Vol. 29, no. 27. — P. 8694–8702. — URL: https://doi.org/10.1021/la401264r.

8. Orientation dependence of magneto-resistance behaviour in a carbon nanotube rope / G.C. McIntosh [et al.] // Thin Solid Films. — 2002. — sep. — Vol. 417, no. 1-2. — P. 67–71. — URL: https://doi.org/10.1016/s0040-6090(02)00592-8.

9. Comprehensive model of the optical spectra of carbon nanotubes on a substrate by polarized microscopy / Léonard Monniello [et al.] // Physical Review B. — 2019. — mar. — Vol. 99, no. 11. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.99.115431.

10. Endo Morinobu, Strano Michael S., Ajayan Pulickel M. Potential Applications of Carbon Nanotubes // Topics in Applied Physics. — Springer Berlin Heidelberg, 2007. — P. 13–62. — URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-72865-8_2.

11. Chiang Wei-Hung, Sankaran R. Mohan. Linking catalyst composition to chirality distributions of as-grown single-walled carbon nanotubes by tuning NixFe1-x nanoparticles // Nature Materials. — 2009. — sep. — Vol. 8, no. 11. — P. 882–886. — URL: https://doi.org/10.1038/nmat2531.

12. Narrow-Chirality Distributed Single-Walled Carbon Nanotube Growth from Nonmagnetic Catalyst / Zohreh Ghorannevis [et al.] // Journal of the American Chemical Society. — 2010. — jul. — Vol. 132, no. 28. — P. 9570–9572. — URL: https://doi.org/10.1021/ja103362j.

13. Chiral-Selective Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes on Lattice-Mismatched Epitaxial Cobalt Nanoparticles / Maoshuai He [et al.] // Scientific Reports. — 2013. — mar. — Vol. 3, no. 1. — URL: https://doi.org/10.1038/srep01460.

14. Chirality-specific growth of single-walled carbon nanotubes on solid alloy catalysts / Feng Yang [et al.] // Nature. — 2014. — jun. — Vol. 510, no. 7506. — P. 522–524. — URL: https://doi.org/10.1038/nature13434.

15. Chemical vapor deposition synthesis of near-zigzag single-walled carbon nanotubes with stable tube-catalyst interface / Qiuchen Zhao [et al.] // Science Advances. — 2016. — may. — Vol. 2, no. 5. — P. e1501729. — URL: https://doi.org/10.1126/sciadv.1501729.

16. Isolation of 1 nm Diameter Single-Wall Carbon Nanotube Species Using Aqueous Two-Phase Extraction / Jeffrey A. Fagan [et al.] // ACS Nano. — 2015. — apr. — Vol. 9, no. 5. — P. 5377–5390. — URL: https://doi.org/10.1021/acsnano.5b01123.

17. Green Alexander A., Hersam Mark C. Nearly Single-Chirality Single-Walled Carbon Nanotubes Produced via Orthogonal Iterative Density Gradient Ultracentrifugation // Advanced Materials. — 2011. — apr. — Vol. 23, no. 19. — P. 2185–2190. — URL: https://doi.org/10.1002/adma.201100034.

18. Large-scale single-chirality separation of single-wall carbon nanotubes by simple gel chromatography / Huaping Liu [et al.] // Nature Communications. — 2011. — may. — Vol. 2, no. 1. — URL: https://doi.org/10.1038/ncomms1313.

19. DNA sequence motifs for structure-specific recognition and separation of carbon nanotubes / Xiaomin Tu [et al.] // Nature. — 2009. — jul. — Vol. 460, no. 7252. — P. 250–253. — URL: https://doi.org/10.1038/nature08116.

20. Industrial-scale separation of high-purity single-chirality single-wall carbon nanotubes for biological imaging / Yohei Yomogida [et al.] // Nature Communications. — 2016. — jun. — Vol. 7, no. 1. — URL: https://doi.org/10.1038/ncomms12056.

21. Kharlamova M. V. Electronic properties of pristine and modified single-walled carbon nanotubes // Physics-Uspekhi. — 2013. — nov. — Vol. 56, no. 11. — P. 1047–1073. — URL: https://doi.org/10.3367/ufne.0183.201311a.1145.

22. Kharlamova Marianna V. Advances in tailoring the electronic properties of single-walled carbon nanotubes // Progress in Materials Science. — 2016. — apr. — Vol. 77. — P. 125–211. — URL: https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.09.001.

23. Smith Brian W., Monthioux Marc, Luzzi David E. Encapsulated C60 in carbon nanotubes // Nature. — 1998. — nov. — Vol. 396, no. 6709. — P. 323–324. — URL: https://doi.org/10.1038/24521.

24. The opening and filling of single walled carbon nanotubes (SWTs) / Jeremy Sloan [et al.] // Chemical Communications. — 1998. — no. 3. — P. 347–348. — URL: https://doi.org/10.1039/a707632k.

25. Metal Nanowires and Intercalated Metal Layers in Single-Walled Carbon Nanotube Bundles / A. Govindaraj [et al.] // Chemistry of Materials. — 2000. — jan. — Vol. 12, no. 1. — P. 202–205. — URL: https://doi.org/10.1021/cm990546o.

26. Metallization of single-wall carbon nanotube thin films induced by gas phase iodination / A. A. Tonkikh [et al.] // Carbon. — 2015. — nov. — Vol. 94. — P. 768–774. — URL: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.07.062.

27. Silver filled single-wall carbon nanotubes—synthesis, structural and electronic properties / E. Borowiak-Palen [et al.] // Nanotechnology. — 2006. — apr. — Vol. 17, no. 9. — P. 2415–2419. — URL: https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/9/058.

28. Characterization of single wall carbon nanotubes filled with silver and with chromium compounds / P. Corio [et al.] // Chemical Physics Letters. — 2004. — jan. — Vol. 383, no. 5-6. — P. 475–480. — URL: https://doi.org/10.1016/j.cplett.2003.11.061.

29. Kharlamova M. V., Niu J. J. Comparison of metallic silver and copper doping effects on single-walled carbon nanotubes // Applied Physics A. — 2012. — aug. — Vol. 109, no. 1. — P. 25–29. — URL: https://doi.org/10.1007/s00339-012-7091-3.

30. Kharlamova M. V., Niu J. J. Donor doping of single-walled carbon nanotubes by filling of channels with silver // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2012. — sep. — Vol. 115, no. 3. — P. 485–491. — URL: https://doi.org/10.1134/s1063776112080092.

31. Kharlamova M. V., Niu J. J. New method of the directional modification of the electronic structure of single-walled carbon nanotubes by filling channels with metallic copper from a liquid phase // JETP Letters. — 2012. — may. — Vol. 95, no. 6. — P. 314–319. — URL: https://doi.org/10.1134/s0021364012060057.

32. Conducting linear chains of sulphur inside carbon nanotubes / Toshihiko Fujimori [et al.] // Nature Communications. — 2013. — jul. — Vol. 4, no. 1. — URL: https://doi.org/10.1038/ncomms3162.

33. An encapsulated helical one-dimensional cobalt iodide nanostructure / Eilidh Philp [et al.] // Nature Materials. — 2003. — nov. — Vol. 2, no. 12. — P. 788–791. — URL: https://doi.org/10.1038/nmat1020.

34. Two layer 4:4 co-ordinated KI crystals grown within single walled carbon nanotubes / J. Sloan [et al.] // Chemical Physics Letters. — 2000. — oct. — Vol. 329, no. 1-2. — P. 61–65. — URL: https://doi.org/10.1016/s0009-2614(00)00998-2.

35. Integral atomic layer architectures of 1D crystals inserted into single walled carbon nanotubes / Jeremy Sloan [et al.] // Chemical Communications. — 2002. — apr. — no. 13. — P. 1319–1332. — URL: https://doi.org/10.1039/b200537a.

36. Structural changes induced in nanocrystals of binary compounds confined within single walled carbon nanotubes: a brief review / Jeremy Sloan [et al.] // Inorganica Chimica Acta. — 2002. — mar. — Vol. 330, no. 1. — P. 1–12. — URL: https://doi.org/10.1016/s0020-1693(01)00774-5.

37. One-Dimensional Crystals inside Single-Walled Carbon Nanotubes: Growth, Structure and Electronic Properties / Andrei Eliseev [et al.] // Electronic Properties of Carbon Nanotubes. — InTech, 2011. — jul. — URL: https://doi.org/10.5772/19060.

38. Aspects of crystal growth within carbon nanotubes / Jeremy Sloan [et al.] // Comptes Rendus Physique. — 2003. — nov. — Vol. 4, no. 9. — P. 1063–1074. — URL: https://doi.org/10.1016/s1631-0705(03)00102-6.

39. Correlation of Structural and Electronic Properties in a New Low-Dimensional Form of Mercury Telluride / Robin Carter [et al.] // Physical Review Letters. — 2006. — may. — Vol. 96, no. 21. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.96.215501.

40. Band gap expansion, shear inversion phase change behaviour and low-voltage induced crystal oscillation in low-dimensional tin selenide crystals / Robin Carter [et al.] // Dalton Trans. — 2014. — Vol. 43, no. 20. — P. 7391–7399. — URL: https://doi.org/10.1039/c4dt00185k.

41. Kharlamova M. V. Novel approach to tailoring the electronic properties of single-walled carbon nanotubes by the encapsulation of high-melting gallium selenide using a single-step process // JETP Letters. — 2013. — nov. — Vol. 98, no. 5. — P. 272–277. — URL: https://doi.org/10.1134/s0021364013180069.

42. Kharlamova M. V. Comparative analysis of electronic properties of tin, gallium, and bismuth chalcogenide-filled single-walled carbon nanotubes // Journal of Materials Science. — 2014. — aug. — Vol. 49, no. 24. — P. 8402–8411. — URL: https://doi.org/10.1007/s10853-014-8550-3.

43. Growth and Characterization of One-Dimensional SnTe Crystals within the Single-Walled Carbon Nanotube Channels / L. V. Yashina [et al.] // The Journal of Physical Chemistry C. — 2011. — feb. — Vol. 115, no. 9. — P. 3578–3586. — URL: https://doi.org/10.1021/jp1107087.

44. Encapsulation of RexOyClusters within Single-Walled Carbon Nanotubes and Theirin tubuloReduction and Sintering to Re Metal / Pedro M. F. J. Costa [et al.] // Chemistry of Materials. — 2005. — dec. — Vol. 17, no. 26. — P. 6579–6582. — URL: https://doi.org/10.1021/cm0510209.

45. Light-induced instability of PbO-filled single-wall carbon nanotubes / Martin Hulman [et al.] // Applied Physics Letters. — 2004. — sep. — Vol. 85, no. 11. — P. 2068–2070. — URL: https://doi.org/10.1063/1.1790603.

46. Abundance of encapsulated C60 in single-wall carbon nanotubes / Beatrice Burteaux [et al.] // Chemical Physics Letters. — 1999. — aug. — Vol. 310, no. 1-2. — P. 21–24. — URL: https://doi.org/10.1016/s0009-2614(99)00720-4.

47. Toward Controlled Spacing in One-Dimensional Molecular Chains: Alkyl-Chain-Functionalized Fullerenes in Carbon Nanotubes / Thomas W. Chamberlain [et al.] // Journal of the American Chemical Society. — 2007. — jul. — Vol. 129, no. 27. — P. 8609–8614. — URL: https://doi.org/10.1021/ja071803q.

48. Functionalised endohedral fullerenes in single-walled carbon nanotubes / Maria del Carmen Gimenez-Lopez [et al.] // Chem. Commun. — 2011. — Vol. 47, no. 7. — P. 2116–2118. — URL: https://doi.org/10.1039/c0cc02929g.

49. High-yield fullerene encapsulation in single-wall carbon nanotubes / H. Kataura [et al.] // Synthetic Metals. — 2001. — mar. — Vol. 121, no. 1-3. — P. 1195–1196. — URL: https://doi.org/10.1016/s0379-6779(00)00707-4.

50. Direct Imaging ofSc2@C84Molecules Encapsulated Inside Single-Wall Carbon Nanotubes by High Resolution Electron Microscopy with Atomic Sensitivity / K. Suenaga [et al.] // Physical Review Letters. — 2003. — feb. — Vol. 90, no. 5. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.90.055506.

51. Ferrocene-filled single-walled carbon nanotubes / Lunhui Guan [et al.] // Carbon. — 2005. — nov. — Vol. 43, no. 13. — P. 2780–2785. — URL: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.05.025.

52. Diameter-selective encapsulation of metallocenes in single-walled carbon nanotubes / Lain-Jong Li [et al.] // Nature Materials. — 2005. — may. — Vol. 4, no. 6. — P. 481–485. — URL: https://doi.org/10.1038/nmat1396.

53. A Catalytic Reaction Inside a Single-Walled Carbon Nanotube / Hidetsugu Shiozawa [et al.] // Advanced Materials. — 2008. — apr. — Vol. 20, no. 8. — P. 1443–1449. — URL: https://doi.org/10.1002/adma.200701466.

54. Nanochemical reactions by laser annealing of ferrocene filled single-walled carbon nanotubes / Antonio Briones [et al.] // physica status solidi (b). — 2011. — sep. — Vol. 248, no. 11. — P. 2488–2491. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.201100114.

55. Inner tube growth properties and electronic structure of ferrocene-filled large diameter single-walled carbon nanotubes / Marianna V. Kharlamova [et al.] // Physica status solidi (b). — 2013. — nov. — Vol. 250, no. 12. — P. 2575–2580. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.201300089.

56. In situRaman spectroscopy studies on time-dependent inner tube growth in ferrocene-filled large diameter single-walled carbon nanotubes / Marianna V. Kharlamova [et al.] // Physica status solidi (b). — 2014. — sep. — Vol. 251, no. 12. — P. 2394–2400. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.201451166.

57. Temperature dependence of inner tube growth from ferrocene-filled single-walled carbon nanotubes / Xianjie Liu [et al.] // Physica status solidi (b). — 2011. — sep. — Vol. 248, no. 11. — P. 2492–2495. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.201100116.

58. In situfilling of metallic single-walled carbon nanotubes with ferrocene molecules / Markus Sauer [et al.] // Physica status solidi (b). — 2012. — oct. — Vol. 249, no. 12. — P. 2408–2411. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.201200127.

59. Ferrocene encapsulated in single-wall carbon nanotubes: a precursor to secondary tubes / Hidetsugu Shiozawa [et al.] // Physica status solidi (b). — 2007. — nov. — Vol. 244, no. 11. — P. 4102–4105. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.200776137.

60. Fine tuning the charge transfer in carbon nanotubes via the interconversion of encapsulated molecules / H. Shiozawa [et al.] // Physical Review B. — 2008. — apr. — Vol. 77, no. 15. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.77.153402.

61. Ferrocene encapsulation in carbon nanotubes: Various methods of filling and investigation / Dorina Kocsis [et al.] // Physica status solidi (b). — 2011. — sep. — Vol. 248, no. 11. — P. 2512–2515. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.201100160.

62. Selective Enhancement of Photoluminescence in Filled Single-Walled Carbon Nanotubes / Xianjie Liu [et al.] // Advanced Functional Materials. — 2012. — apr. — Vol. 22, no. 15. — P. 3202–3208. — URL: https://doi.org/10.1002/adfm.201200224.

63. Electronic Structure of Carbon Nanotubes with Ultrahigh Curvature / Wolfgang Plank [et al.] // ACS Nano. — 2010. — jul. — Vol. 4, no. 8. — P. 4515–4522. — URL: https://doi.org/10.1021/nn100615d.

64. Internal charge transfer in metallicity sorted ferrocene filled carbon nanotube hybrids / Markus Sauer [et al.] // Carbon. — 2013. — aug. — Vol. 59. — P. 237–245. — URL: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.03.014.

65. Growth dynamics of inner tubes inside cobaltocene-filled single-walled carbon nanotubes / M. V. Kharlamova [et al.] // Applied Physics A. — 2016. — jul. — Vol. 122, no. 8. — URL: https://doi.org/10.1007/s00339-016-0282-6.

66. Chiral vector and metal catalyst-dependent growth kinetics of single-wall carbon nanotubes / Marianna V. Kharlamova [et al.] // Carbon. — 2018. — jul. — Vol. 133. — P. 283–292. — URL: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.03.046.

67. Doping of single-walled carbon nanotubes controlled via chemical transformation of encapsulated nickelocene / Marianna V. Kharlamova [et al.] // Nanoscale. — 2015. — Vol. 7, no. 4. — P. 1383–1391. — URL: https://doi.org/10.1039/c4nr05586a.

68. Temperature-dependent inner tube growth and electronic structure of nickelocene-filled single-walled carbon nanotubes / Marianna V. Kharlamova [et al.] // Physica status solidi (b). — 2015. — aug. — Vol. 252, no. 11. — P. 2485–2490. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.201552206.

69. Chirality-dependent growth of single-wall carbon nanotubes as revealed inside nano-test tubes / Marianna V. Kharlamova [et al.] // Nanoscale. — 2017. — Vol. 9, no. 23. — P. 7998–8006. — URL: https://doi.org/10.1039/c7nr01846k.

70. Inner tube growth and electronic properties of metallicity-sorted nickelocene-filled semiconducting single-walled carbon nanotubes / M. V. Kharlamova [et al.] // Applied Physics A. — 2018. — feb. — Vol. 124, no. 3. — URL: https://doi.org/10.1007/s00339-018-1679-1.

71. Screening the Missing Electron: Nanochemistry in Action / H. Shiozawa [et al.] // Physical Review Letters. — 2009. — jan. — Vol. 102, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.102.046804.

72. Electronic properties of single-walled carbon nanotubes encapsulating a cerium organometallic compound / Hidetsugu Shiozawa [et al.] // Physica status solidi (b). — 2009. — nov. — Vol. 246, no. 11-12. — P. 2626–2630. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.200982344.

73. Zhang Rufan, Zhang Yingying, Wei Fei. Horizontally aligned carbon nanotube arrays: growth mechanism, controlled synthesis, characterization, properties and applications // Chemical Society Reviews. — 2017. — Vol. 46, no. 12. — P. 3661–3715. — URL: https://doi.org/10.1039/c7cs00104e.

74. Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications / Michael F. L. De Volder [et al.] // Science. — 2013. — jan. — Vol. 339, no. 6119. — P. 535–539. — URL: https://doi.org/10.1126/science.1222453.

75. Carbon nanomaterials for electronics, optoelectronics, photovoltaics, and sensing / Deep Jariwala [et al.] // Chem. Soc. Rev. — 2013. — Vol. 42, no. 7. — P. 2824–2860. — URL: https://doi.org/10.1039/c2cs35335k.

76. In situ evidence for chirality-dependent growth rates of individual carbon nanotubes / Rahul Rao [et al.] // Nature Materials. — 2012. — jan. — Vol. 11, no. 3. — P. 213–216. — URL: https://doi.org/10.1038/nmat3231.

77. Self-Deactivation of Single-Walled Carbon Nanotube Growth Studied by inSitu Raman Measurements / Matthieu Picher [et al.] // Nano Letters. — 2009. — feb. — Vol. 9, no. 2. — P. 542–547. — URL: https://doi.org/10.1021/nl802661z.

78. In situ study of single-walled carbon nanotube growth in an environmental scanning electron microscope / H-A Mehedi [et al.] // Nanotechnology. — 2016. — nov. — Vol. 27, no. 50. — P. 505701. — URL: https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/50/505701.

79. Increased chemical reactivity of single-walled carbon nanotubes on oxide substrates: In situ imaging and effect of electron and laser irradiations / Hasan al Mehedi [et al.] // Nano Research. — 2015. — dec. — Vol. 9, no. 2. — P. 517–529. — URL: https://doi.org/10.1007/s12274-015-0933-5.

80. Structural Properties of Double-Walled Carbon Nanotubes Driven by Mechanical Interlayer Coupling / Ahmed Ghedjatti [et al.] // ACS Nano. — 2017. — may. — Vol. 11, no. 5. — P. 4840–4847. — URL: https://doi.org/10.1021/acsnano.7b01328.

81. Raman spectroscopy of graphene and carbon nanotubes / R. Saito [et al.] // Advances in Physics. — 2011. — jun. — Vol. 60, no. 3. — P. 413–550. — URL: https://doi.org/10.1080/00018732.2011.582251.

82. Sfeir M. Y. Probing Electronic Transitions in Individual Carbon Nanotubes by Rayleigh Scattering // Science. — 2004. — nov. — Vol. 306, no. 5701. — P. 1540–1543. — URL: https://doi.org/10.1126/science.1103294.

83. On-Chip Rayleigh Imaging and Spectroscopy of Carbon Nanotubes / Daniel Y. Joh [et al.] // Nano Letters. — 2011. — jan. — Vol. 11, no. 1. — P. 1–7. — URL: https://doi.org/10.1021/nl1012568.

84. True-color real-time imaging and spectroscopy of carbon nanotubes on substrates using enhanced Rayleigh scattering / Wenyun Wu [et al.] // Nano Research. — 2015. — aug. — Vol. 8, no. 8. — P. 2721–2732. — URL: https://doi.org/10.1007/s12274-015-0779-x.

85. Laser-based imaging of individual carbon nanostructures / Robin W. Havener [et al.] // NPG Asia Materials. — 2011. — oct. — Vol. 3, no. 10. — P. 91–99. — URL: https://doi.org/10.1038/asiamat.2011.145.

86. Lefebvre Jacques, Finnie Paul. Polarized light microscopy and spectroscopy of individual single-walled carbon nanotubes // Nano Research. — 2011. — may. — Vol. 4, no. 8. — P. 788–794. — URL: https://doi.org/10.1007/s12274-011-0135-8.

87. High-throughput optical imaging and spectroscopy of individual carbon nanotubes in devices / Kaihui Liu [et al.] // Nature Nanotechnology. — 2013. — nov. — Vol. 8, no. 12. — P. 917–922. — URL: https://doi.org/10.1038/nnano.2013.227.

88. High-Throughput Determination of Statistical Structure Information for Horizontal Carbon Nanotube Arrays by Optical Imaging / Shibin Deng [et al.] // Advanced Materials. — 2016. — jan. — Vol. 28, no. 10. — P. 2018–2023. — URL: https://doi.org/10.1002/adma.201505253.

89. Hwang Jaesuk, Moerner W.E. Interferometry of a single nanoparticle using the Gouy phase of a focused laser beam // Optics Communications. — 2007. — dec. — Vol. 280, no. 2. — P. 487–491. — URL: https://doi.org/10.1016/j.optcom.2007.08.032.

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

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

E-mail: ekaterina.torutanova@yandex.ru
ORCID iD 0000-0002-1443-7946
Web of Science ResearcherID AAX-8439-2021

Investigation of optical transmission and reflection of a nanocomposite with inclusions from carbon nanomaterials

K. K. Altunin, E. V. Torutanova

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted June 7, 2021
Resubmitted June 17, 2021
Published September 9, 2021

Abstract. The results of studying the optical transmission and reflection of a nanocomposite with nanosized inclusions of carbon nanomaterials are considered. A theoretical model has been constructed to describe optical processes in nanocomposite structures with nanosized carbon nanotube inclusions. The method of numerical calculation of the effective optical parameters of nanocomposite structures with inclusions from carbon nanotubes has been modified. A numerical model of optical processes in nanocomposite structures with inclusions of carbon nanotubes has been constructed and a computer program in the Python programming language has been developed to calculate the optical characteristics of a nanocomposite structure with inclusions in the form of carbon nanotubes. The numerical calculations of the optical parameters of the nanocomposite structure with carbon nanotubes have shown that it is possible to significantly increase the optical transmission at certain geometric parameters of the nanocomposite structure with carbon nanotubes.

Keywords: nanocomposite, nanocomposite film, carbon nanomaterial, optical radiation, optical transmittance, optical reflection coefficient, antireflection optical coating, optical devices, nanotube

PACS: 42.25.Bs

References

1. Ion irradiation effects on conduction in single-wall carbon nanotube networks / V. Skákalová [et al.] // Applied Physics A. — 2008. — jan. — Vol. 90, no. 4. — P. 597–602. — URL: https://doi.org/10.1007/s00339-007-4383-0.

2. Yosida Y., Oguro I. Variable range hopping conduction in bulk samples composed of single-walled carbon nanotubes // Journal of Applied Physics. — 1999. — jul. — Vol. 86, no. 2. — P. 999–1003. — URL: https://doi.org/10.1063/1.370838.

3. Magnetoresistance of an entangled single-wall carbon-nanotube network / G. T. Kim [et al.] // Physical Review B. — 1998. — dec. — Vol. 58, no. 24. — P. 16064–16069. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.58.16064.

4. Takano Takumi, Takenobu Taishi, Iwasa Yoshihiro. Enhancement of Carrier Hopping by Doping in Single Walled Carbon Nanotube Films // Journal of the Physical Society of Japan. — 2008. — dec. — Vol. 77, no. 12. — P. 124709. — URL: https://doi.org/10.1143/jpsj.77.124709.

5. Quantum Transport in a Multiwalled Carbon Nanotube / L. Langer [et al.] // Physical Review Letters. — 1996. — jan. — Vol. 76, no. 3. — P. 479–482. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.76.479.

6. Vavro J., Kikkawa J. M., Fischer J. E. Metal-insulator transition in doped single-wall carbon nanotubes // Physical Review B. — 2005. — apr. — Vol. 71, no. 15. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.71.155410.

7. Variable Range Hopping in Single-Wall Carbon Nanotube Thin Films: A Processing–Structure–Property Relationship Study / Sida Luo [et al.] // Langmuir. — 2013. — jun. — Vol. 29, no. 27. — P. 8694–8702. — URL: https://doi.org/10.1021/la401264r.

8. Orientation dependence of magneto-resistance behaviour in a carbon nanotube rope / G.C. McIntosh [et al.] // Thin Solid Films. — 2002. — sep. — Vol. 417, no. 1-2. — P. 67–71. — URL: https://doi.org/10.1016/s0040-6090(02)00592-8.

9. Comprehensive model of the optical spectra of carbon nanotubes on a substrate by polarized microscopy / Léonard Monniello [et al.] // Physical Review B. — 2019. — mar. — Vol. 99, no. 11. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.99.115431.

10. Endo Morinobu, Strano Michael S., Ajayan Pulickel M. Potential Applications of Carbon Nanotubes // Topics in Applied Physics. — Springer Berlin Heidelberg, 2007. — P. 13–62. — URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-72865-8_2.

11. Chiang Wei-Hung, Sankaran R. Mohan. Linking catalyst composition to chirality distributions of as-grown single-walled carbon nanotubes by tuning NixFe1-x nanoparticles // Nature Materials. — 2009. — sep. — Vol. 8, no. 11. — P. 882–886. — URL: https://doi.org/10.1038/nmat2531.

12. Narrow-Chirality Distributed Single-Walled Carbon Nanotube Growth from Nonmagnetic Catalyst / Zohreh Ghorannevis [et al.] // Journal of the American Chemical Society. — 2010. — jul. — Vol. 132, no. 28. — P. 9570–9572. — URL: https://doi.org/10.1021/ja103362j.

13. Chiral-Selective Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes on Lattice-Mismatched Epitaxial Cobalt Nanoparticles / Maoshuai He [et al.] // Scientific Reports. — 2013. — mar. — Vol. 3, no. 1. — URL: https://doi.org/10.1038/srep01460.

14. Chirality-specific growth of single-walled carbon nanotubes on solid alloy catalysts / Feng Yang [et al.] // Nature. — 2014. — jun. — Vol. 510, no. 7506. — P. 522–524. — URL: https://doi.org/10.1038/nature13434.

15. Chemical vapor deposition synthesis of near-zigzag single-walled carbon nanotubes with stable tube-catalyst interface / Qiuchen Zhao [et al.] // Science Advances. — 2016. — may. — Vol. 2, no. 5. — P. e1501729. — URL: https://doi.org/10.1126/sciadv.1501729.

16. Isolation of 1 nm Diameter Single-Wall Carbon Nanotube Species Using Aqueous Two-Phase Extraction / Jeffrey A. Fagan [et al.] // ACS Nano. — 2015. — apr. — Vol. 9, no. 5. — P. 5377–5390. — URL: https://doi.org/10.1021/acsnano.5b01123.

17. Green Alexander A., Hersam Mark C. Nearly Single-Chirality Single-Walled Carbon Nanotubes Produced via Orthogonal Iterative Density Gradient Ultracentrifugation // Advanced Materials. — 2011. — apr. — Vol. 23, no. 19. — P. 2185–2190. — URL: https://doi.org/10.1002/adma.201100034.

18. Large-scale single-chirality separation of single-wall carbon nanotubes by simple gel chromatography / Huaping Liu [et al.] // Nature Communications. — 2011. — may. — Vol. 2, no. 1. — URL: https://doi.org/10.1038/ncomms1313.

19. DNA sequence motifs for structure-specific recognition and separation of carbon nanotubes / Xiaomin Tu [et al.] // Nature. — 2009. — jul. — Vol. 460, no. 7252. — P. 250–253. — URL: https://doi.org/10.1038/nature08116.

20. Industrial-scale separation of high-purity single-chirality single-wall carbon nanotubes for biological imaging / Yohei Yomogida [et al.] // Nature Communications. — 2016. — jun. — Vol. 7, no. 1. — URL: https://doi.org/10.1038/ncomms12056.

21. Kharlamova M. V. Electronic properties of pristine and modified single-walled carbon nanotubes // Physics-Uspekhi. — 2013. — nov. — Vol. 56, no. 11. — P. 1047–1073. — URL: https://doi.org/10.3367/ufne.0183.201311a.1145.

22. Kharlamova Marianna V. Advances in tailoring the electronic properties of single-walled carbon nanotubes // Progress in Materials Science. — 2016. — apr. — Vol. 77. — P. 125–211. — URL: https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.09.001.

23. Smith Brian W., Monthioux Marc, Luzzi David E. Encapsulated C60 in carbon nanotubes // Nature. — 1998. — nov. — Vol. 396, no. 6709. — P. 323–324. — URL: https://doi.org/10.1038/24521.

24. The opening and filling of single walled carbon nanotubes (SWTs) / Jeremy Sloan [et al.] // Chemical Communications. — 1998. — no. 3. — P. 347–348. — URL: https://doi.org/10.1039/a707632k.

25. Metal Nanowires and Intercalated Metal Layers in Single-Walled Carbon Nanotube Bundles / A. Govindaraj [et al.] // Chemistry of Materials. — 2000. — jan. — Vol. 12, no. 1. — P. 202–205. — URL: https://doi.org/10.1021/cm990546o.

26. Metallization of single-wall carbon nanotube thin films induced by gas phase iodination / A. A. Tonkikh [et al.] // Carbon. — 2015. — nov. — Vol. 94. — P. 768–774. — URL: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.07.062.

27. Silver filled single-wall carbon nanotubes—synthesis, structural and electronic properties / E. Borowiak-Palen [et al.] // Nanotechnology. — 2006. — apr. — Vol. 17, no. 9. — P. 2415–2419. — URL: https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/9/058.

28. Characterization of single wall carbon nanotubes filled with silver and with chromium compounds / P. Corio [et al.] // Chemical Physics Letters. — 2004. — jan. — Vol. 383, no. 5-6. — P. 475–480. — URL: https://doi.org/10.1016/j.cplett.2003.11.061.

29. Kharlamova M. V., Niu J. J. Comparison of metallic silver and copper doping effects on single-walled carbon nanotubes // Applied Physics A. — 2012. — aug. — Vol. 109, no. 1. — P. 25–29. — URL: https://doi.org/10.1007/s00339-012-7091-3.

30. Kharlamova M. V., Niu J. J. Donor doping of single-walled carbon nanotubes by filling of channels with silver // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2012. — sep. — Vol. 115, no. 3. — P. 485–491. — URL: https://doi.org/10.1134/s1063776112080092.

31. Kharlamova M. V., Niu J. J. New method of the directional modification of the electronic structure of single-walled carbon nanotubes by filling channels with metallic copper from a liquid phase // JETP Letters. — 2012. — may. — Vol. 95, no. 6. — P. 314–319. — URL: https://doi.org/10.1134/s0021364012060057.

32. Conducting linear chains of sulphur inside carbon nanotubes / Toshihiko Fujimori [et al.] // Nature Communications. — 2013. — jul. — Vol. 4, no. 1. — URL: https://doi.org/10.1038/ncomms3162.

33. An encapsulated helical one-dimensional cobalt iodide nanostructure / Eilidh Philp [et al.] // Nature Materials. — 2003. — nov. — Vol. 2, no. 12. — P. 788–791. — URL: https://doi.org/10.1038/nmat1020.

34. Two layer 4:4 co-ordinated KI crystals grown within single walled carbon nanotubes / J. Sloan [et al.] // Chemical Physics Letters. — 2000. — oct. — Vol. 329, no. 1-2. — P. 61–65. — URL: https://doi.org/10.1016/s0009-2614(00)00998-2.

35. Integral atomic layer architectures of 1D crystals inserted into single walled carbon nanotubes / Jeremy Sloan [et al.] // Chemical Communications. — 2002. — apr. — no. 13. — P. 1319–1332. — URL: https://doi.org/10.1039/b200537a.

36. Structural changes induced in nanocrystals of binary compounds confined within single walled carbon nanotubes: a brief review / Jeremy Sloan [et al.] // Inorganica Chimica Acta. — 2002. — mar. — Vol. 330, no. 1. — P. 1–12. — URL: https://doi.org/10.1016/s0020-1693(01)00774-5.

37. One-Dimensional Crystals inside Single-Walled Carbon Nanotubes: Growth, Structure and Electronic Properties / Andrei Eliseev [et al.] // Electronic Properties of Carbon Nanotubes. — InTech, 2011. — jul. — URL: https://doi.org/10.5772/19060.

38. Aspects of crystal growth within carbon nanotubes / Jeremy Sloan [et al.] // Comptes Rendus Physique. — 2003. — nov. — Vol. 4, no. 9. — P. 1063–1074. — URL: https://doi.org/10.1016/s1631-0705(03)00102-6.

39. Correlation of Structural and Electronic Properties in a New Low-Dimensional Form of Mercury Telluride / Robin Carter [et al.] // Physical Review Letters. — 2006. — may. — Vol. 96, no. 21. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.96.215501.

40. Band gap expansion, shear inversion phase change behaviour and low-voltage induced crystal oscillation in low-dimensional tin selenide crystals / Robin Carter [et al.] // Dalton Trans. — 2014. — Vol. 43, no. 20. — P. 7391–7399. — URL: https://doi.org/10.1039/c4dt00185k.

41. Kharlamova M. V. Novel approach to tailoring the electronic properties of single-walled carbon nanotubes by the encapsulation of high-melting gallium selenide using a single-step process // JETP Letters. — 2013. — nov. — Vol. 98, no. 5. — P. 272–277. — URL: https://doi.org/10.1134/s0021364013180069.

42. Kharlamova M. V. Comparative analysis of electronic properties of tin, gallium, and bismuth chalcogenide-filled single-walled carbon nanotubes // Journal of Materials Science. — 2014. — aug. — Vol. 49, no. 24. — P. 8402–8411. — URL: https://doi.org/10.1007/s10853-014-8550-3.

43. Growth and Characterization of One-Dimensional SnTe Crystals within the Single-Walled Carbon Nanotube Channels / L. V. Yashina [et al.] // The Journal of Physical Chemistry C. — 2011. — feb. — Vol. 115, no. 9. — P. 3578–3586. — URL: https://doi.org/10.1021/jp1107087.

44. Encapsulation of RexOyClusters within Single-Walled Carbon Nanotubes and Theirin tubuloReduction and Sintering to Re Metal / Pedro M. F. J. Costa [et al.] // Chemistry of Materials. — 2005. — dec. — Vol. 17, no. 26. — P. 6579–6582. — URL: https://doi.org/10.1021/cm0510209.

45. Light-induced instability of PbO-filled single-wall carbon nanotubes / Martin Hulman [et al.] // Applied Physics Letters. — 2004. — sep. — Vol. 85, no. 11. — P. 2068–2070. — URL: https://doi.org/10.1063/1.1790603.

46. Abundance of encapsulated C60 in single-wall carbon nanotubes / Beatrice Burteaux [et al.] // Chemical Physics Letters. — 1999. — aug. — Vol. 310, no. 1-2. — P. 21–24. — URL: https://doi.org/10.1016/s0009-2614(99)00720-4.

47. Toward Controlled Spacing in One-Dimensional Molecular Chains: Alkyl-Chain-Functionalized Fullerenes in Carbon Nanotubes / Thomas W. Chamberlain [et al.] // Journal of the American Chemical Society. — 2007. — jul. — Vol. 129, no. 27. — P. 8609–8614. — URL: https://doi.org/10.1021/ja071803q.

48. Functionalised endohedral fullerenes in single-walled carbon nanotubes / Maria del Carmen Gimenez-Lopez [et al.] // Chem. Commun. — 2011. — Vol. 47, no. 7. — P. 2116–2118. — URL: https://doi.org/10.1039/c0cc02929g.

49. High-yield fullerene encapsulation in single-wall carbon nanotubes / H. Kataura [et al.] // Synthetic Metals. — 2001. — mar. — Vol. 121, no. 1-3. — P. 1195–1196. — URL: https://doi.org/10.1016/s0379-6779(00)00707-4.

50. Direct Imaging ofSc2@C84Molecules Encapsulated Inside Single-Wall Carbon Nanotubes by High Resolution Electron Microscopy with Atomic Sensitivity / K. Suenaga [et al.] // Physical Review Letters. — 2003. — feb. — Vol. 90, no. 5. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.90.055506.

51. Ferrocene-filled single-walled carbon nanotubes / Lunhui Guan [et al.] // Carbon. — 2005. — nov. — Vol. 43, no. 13. — P. 2780–2785. — URL: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.05.025.

52. Diameter-selective encapsulation of metallocenes in single-walled carbon nanotubes / Lain-Jong Li [et al.] // Nature Materials. — 2005. — may. — Vol. 4, no. 6. — P. 481–485. — URL: https://doi.org/10.1038/nmat1396.

53. A Catalytic Reaction Inside a Single-Walled Carbon Nanotube / Hidetsugu Shiozawa [et al.] // Advanced Materials. — 2008. — apr. — Vol. 20, no. 8. — P. 1443–1449. — URL: https://doi.org/10.1002/adma.200701466.

54. Nanochemical reactions by laser annealing of ferrocene filled single-walled carbon nanotubes / Antonio Briones [et al.] // physica status solidi (b). — 2011. — sep. — Vol. 248, no. 11. — P. 2488–2491. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.201100114.

55. Inner tube growth properties and electronic structure of ferrocene-filled large diameter single-walled carbon nanotubes / Marianna V. Kharlamova [et al.] // Physica status solidi (b). — 2013. — nov. — Vol. 250, no. 12. — P. 2575–2580. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.201300089.

56. In situRaman spectroscopy studies on time-dependent inner tube growth in ferrocene-filled large diameter single-walled carbon nanotubes / Marianna V. Kharlamova [et al.] // Physica status solidi (b). — 2014. — sep. — Vol. 251, no. 12. — P. 2394–2400. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.201451166.

57. Temperature dependence of inner tube growth from ferrocene-filled single-walled carbon nanotubes / Xianjie Liu [et al.] // Physica status solidi (b). — 2011. — sep. — Vol. 248, no. 11. — P. 2492–2495. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.201100116.

58. In situfilling of metallic single-walled carbon nanotubes with ferrocene molecules / Markus Sauer [et al.] // Physica status solidi (b). — 2012. — oct. — Vol. 249, no. 12. — P. 2408–2411. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.201200127.

59. Ferrocene encapsulated in single-wall carbon nanotubes: a precursor to secondary tubes / Hidetsugu Shiozawa [et al.] // Physica status solidi (b). — 2007. — nov. — Vol. 244, no. 11. — P. 4102–4105. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.200776137.

60. Fine tuning the charge transfer in carbon nanotubes via the interconversion of encapsulated molecules / H. Shiozawa [et al.] // Physical Review B. — 2008. — apr. — Vol. 77, no. 15. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.77.153402.

61. Ferrocene encapsulation in carbon nanotubes: Various methods of filling and investigation / Dorina Kocsis [et al.] // Physica status solidi (b). — 2011. — sep. — Vol. 248, no. 11. — P. 2512–2515. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.201100160.

62. Selective Enhancement of Photoluminescence in Filled Single-Walled Carbon Nanotubes / Xianjie Liu [et al.] // Advanced Functional Materials. — 2012. — apr. — Vol. 22, no. 15. — P. 3202–3208. — URL: https://doi.org/10.1002/adfm.201200224.

63. Electronic Structure of Carbon Nanotubes with Ultrahigh Curvature / Wolfgang Plank [et al.] // ACS Nano. — 2010. — jul. — Vol. 4, no. 8. — P. 4515–4522. — URL: https://doi.org/10.1021/nn100615d.

64. Internal charge transfer in metallicity sorted ferrocene filled carbon nanotube hybrids / Markus Sauer [et al.] // Carbon. — 2013. — aug. — Vol. 59. — P. 237–245. — URL: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.03.014.

65. Growth dynamics of inner tubes inside cobaltocene-filled single-walled carbon nanotubes / M. V. Kharlamova [et al.] // Applied Physics A. — 2016. — jul. — Vol. 122, no. 8. — URL: https://doi.org/10.1007/s00339-016-0282-6.

66. Chiral vector and metal catalyst-dependent growth kinetics of single-wall carbon nanotubes / Marianna V. Kharlamova [et al.] // Carbon. — 2018. — jul. — Vol. 133. — P. 283–292. — URL: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.03.046.

67. Doping of single-walled carbon nanotubes controlled via chemical transformation of encapsulated nickelocene / Marianna V. Kharlamova [et al.] // Nanoscale. — 2015. — Vol. 7, no. 4. — P. 1383–1391. — URL: https://doi.org/10.1039/c4nr05586a.

68. Temperature-dependent inner tube growth and electronic structure of nickelocene-filled single-walled carbon nanotubes / Marianna V. Kharlamova [et al.] // Physica status solidi (b). — 2015. — aug. — Vol. 252, no. 11. — P. 2485–2490. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.201552206.

69. Chirality-dependent growth of single-wall carbon nanotubes as revealed inside nano-test tubes / Marianna V. Kharlamova [et al.] // Nanoscale. — 2017. — Vol. 9, no. 23. — P. 7998–8006. — URL: https://doi.org/10.1039/c7nr01846k.

70. Inner tube growth and electronic properties of metallicity-sorted nickelocene-filled semiconducting single-walled carbon nanotubes / M. V. Kharlamova [et al.] // Applied Physics A. — 2018. — feb. — Vol. 124, no. 3. — URL: https://doi.org/10.1007/s00339-018-1679-1.

71. Screening the Missing Electron: Nanochemistry in Action / H. Shiozawa [et al.] // Physical Review Letters. — 2009. — jan. — Vol. 102, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.102.046804.

72. Electronic properties of single-walled carbon nanotubes encapsulating a cerium organometallic compound / Hidetsugu Shiozawa [et al.] // Physica status solidi (b). — 2009. — nov. — Vol. 246, no. 11-12. — P. 2626–2630. — URL: https://doi.org/10.1002/pssb.200982344.

73. Zhang Rufan, Zhang Yingying, Wei Fei. Horizontally aligned carbon nanotube arrays: growth mechanism, controlled synthesis, characterization, properties and applications // Chemical Society Reviews. — 2017. — Vol. 46, no. 12. — P. 3661–3715. — URL: https://doi.org/10.1039/c7cs00104e.

74. Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications / Michael F. L. De Volder [et al.] // Science. — 2013. — jan. — Vol. 339, no. 6119. — P. 535–539. — URL: https://doi.org/10.1126/science.1222453.

75. Carbon nanomaterials for electronics, optoelectronics, photovoltaics, and sensing / Deep Jariwala [et al.] // Chem. Soc. Rev. — 2013. — Vol. 42, no. 7. — P. 2824–2860. — URL: https://doi.org/10.1039/c2cs35335k.

76. In situ evidence for chirality-dependent growth rates of individual carbon nanotubes / Rahul Rao [et al.] // Nature Materials. — 2012. — jan. — Vol. 11, no. 3. — P. 213–216. — URL: https://doi.org/10.1038/nmat3231.

77. Self-Deactivation of Single-Walled Carbon Nanotube Growth Studied by inSitu Raman Measurements / Matthieu Picher [et al.] // Nano Letters. — 2009. — feb. — Vol. 9, no. 2. — P. 542–547. — URL: https://doi.org/10.1021/nl802661z.

78. In situ study of single-walled carbon nanotube growth in an environmental scanning electron microscope / H-A Mehedi [et al.] // Nanotechnology. — 2016. — nov. — Vol. 27, no. 50. — P. 505701. — URL: https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/50/505701.

79. Increased chemical reactivity of single-walled carbon nanotubes on oxide substrates: In situ imaging and effect of electron and laser irradiations / Hasan al Mehedi [et al.] // Nano Research. — 2015. — dec. — Vol. 9, no. 2. — P. 517–529. — URL: https://doi.org/10.1007/s12274-015-0933-5.

80. Structural Properties of Double-Walled Carbon Nanotubes Driven by Mechanical Interlayer Coupling / Ahmed Ghedjatti [et al.] // ACS Nano. — 2017. — may. — Vol. 11, no. 5. — P. 4840–4847. — URL: https://doi.org/10.1021/acsnano.7b01328.

81. Raman spectroscopy of graphene and carbon nanotubes / R. Saito [et al.] // Advances in Physics. — 2011. — jun. — Vol. 60, no. 3. — P. 413–550. — URL: https://doi.org/10.1080/00018732.2011.582251.

82. Sfeir M. Y. Probing Electronic Transitions in Individual Carbon Nanotubes by Rayleigh Scattering // Science. — 2004. — nov. — Vol. 306, no. 5701. — P. 1540–1543. — URL: https://doi.org/10.1126/science.1103294.

83. On-Chip Rayleigh Imaging and Spectroscopy of Carbon Nanotubes / Daniel Y. Joh [et al.] // Nano Letters. — 2011. — jan. — Vol. 11, no. 1. — P. 1–7. — URL: https://doi.org/10.1021/nl1012568.

84. True-color real-time imaging and spectroscopy of carbon nanotubes on substrates using enhanced Rayleigh scattering / Wenyun Wu [et al.] // Nano Research. — 2015. — aug. — Vol. 8, no. 8. — P. 2721–2732. — URL: https://doi.org/10.1007/s12274-015-0779-x.

85. Laser-based imaging of individual carbon nanostructures / Robin W. Havener [et al.] // NPG Asia Materials. — 2011. — oct. — Vol. 3, no. 10. — P. 91–99. — URL: https://doi.org/10.1038/asiamat.2011.145.

86. Lefebvre Jacques, Finnie Paul. Polarized light microscopy and spectroscopy of individual single-walled carbon nanotubes // Nano Research. — 2011. — may. — Vol. 4, no. 8. — P. 788–794. — URL: https://doi.org/10.1007/s12274-011-0135-8.

87. High-throughput optical imaging and spectroscopy of individual carbon nanotubes in devices / Kaihui Liu [et al.] // Nature Nanotechnology. — 2013. — nov. — Vol. 8, no. 12. — P. 917–922. — URL: https://doi.org/10.1038/nnano.2013.227.

88. High-Throughput Determination of Statistical Structure Information for Horizontal Carbon Nanotube Arrays by Optical Imaging / Shibin Deng [et al.] // Advanced Materials. — 2016. — jan. — Vol. 28, no. 10. — P. 2018–2023. — URL: https://doi.org/10.1002/adma.201505253.

89. Hwang Jaesuk, Moerner W.E. Interferometry of a single nanoparticle using the Gouy phase of a focused laser beam // Optics Communications. — 2007. — dec. — Vol. 280, no. 2. — P. 487–491. — URL: https://doi.org/10.1016/j.optcom.2007.08.032.

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 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

Ekaterina Vyacheslavovna Torutanova — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: ekaterina.torutanova@yandex.ru
ORCID iD 0000-0002-1443-7946
Web of Science ResearcherID AAX-8439-2021

УДК 535.3
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 01.04.05

Исследование распространения поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита

К. К. Алтунин, Е. Н. Причалова [1]

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

Поступила в редакцию 5 апреля 2021 года
После переработки 12 апреля 2021 года
Опубликована 9 сентября 2021 года

Аннотация. Рассматривается физический процесс распространения поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита. Построена модифицированная теоретическая модель процесса распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита. Написана компьютерная программа, позволяющая вычислять оптические характеристики поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся вдоль границы раздела диэлектрика и нанокомпозита. Рассчитана плотность потока энергии поверхностного плазмон-поляритона, распространяющегося на границе раздела диэлектрической среды и нанокомпозитной среды, содержащей металлические наночастицы. В результате численных расчётов получены зависимости плотности потока энергии электромагнитных волн поверхностных плазмон-поляритонов от длины волны внешнего оптического излучения для поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита. Произведённый численный расчёт усреднённых значений компонент вектора Умова-Пойнтинга для поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита подтверждает наличие максимумов плотности потока энергии, соответствующих распространению плазмон-поляритона вдоль границы раздела диэлектрика и нанокомпозита.

Ключевые слова: плазмон, поляритон, плазмон-поляритон, нанокомпозитная плёнка, нанокомпозитная среда, металлические наночастицы, наночастицы серебра, диэлектрик, оптическое излучение, электромагнитная волна

PACS: 42.25.Bs

Введение

Взаимодействие света с веществом давно вызывает интерес учёных. В этом контексте область плазмоники возникает из-за взаимодействия света с валентными электронами в металлах. Интерес к исследованию наноплазмонных структур, в которых

[1] E-mail: prichalova.katya@bk.ru

возможно возбуждение и распространение поверхностных плазмон-поляритонов на металлических поверхностях и перфорированных тонких металлических плёнках с субволновыми периодическими отверстиями, связан с применениями в приборах оптики и оптоэлектроники, в которых значительную роль играют эффекты локального усиления полей.

Целью работы является исследование физического процесса распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита.

В работе поставлены следующие задачи:

1. написание обзора работ по наноплазмонике,
2. создание теоретической модели процесса распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита,
3. написание компьютерной программы для вычисления характеристик поверхностного плазмон-поляритона, распространяющегося на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита,
4. проведение численных расчётов оптических характеристик процесса распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита.

Объектом исследования является явление распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита. Предметом исследования является набор оптических характеристик процесса распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита. Методами исследования являются теоретические и численные методы нанооптики и наноплазмоники, методы программирования физических задач нанооптики и наноплазмоники.

Гипотеза исследования заключается в том, что если выявить особенности процесса распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита то можно успешно прогнозировать физические свойства приборов и устройств наноплазмоники.

Обзор работ по физическим свойствам плазмон-поляритонов

Поверхностные плазмон-поляритоны — это электромагнитные возбуждения, существующие на границе раздела между металлом и диэлектрическим материалом. В последние годы в фундаментальных и прикладных исследований в области поверхностных плазмон-поляритонов был достигнут значительный прогресс. Управление светом и управление им с помощью поверхностных плазмон-поляритонов в нанометровом масштабе дает значительные преимущества в устройствах нанофотоники с очень маленькими элементами, а поверхностные плазмон-поляритоны открывают многообещающие возможности в областях, связанных с окружающей средой, энергетикой, биологией и медициной.

Поверхностный плазмон-поляритон — это электромагнитное возбуждение, существующее на поверхности хорошего металла. Это по сути двумерное возбуждение, электромагнитное поле которого экспоненциально затухает с расстоянием от поверхности. Раньше можно было изучать только рассеянный свет (дальнее поле), создаваемый взаимодействием поверхностных поляритонов с элементами поверхности. Только с развитием сканирующей ближнепольной оптической микроскопии стало возможным измерять поле поверхностных поляритонов непосредственно в непосредственной близости от поверхности, на которой существует поверхностный плазмон-поляритон.

Коллективные возбуждения — это простые и информативные исследования различных физических свойств твердых тел. Среди них возбуждения, связанные с взаимодействием света и вещества, пожалуй, одни из самых многочисленных. В частности, по-

ляритоны — это квазичастицы, связанные с взаимодействием электромагнитных волн с любым резонансом в материале. Парадигматический пример поляритонов реализуется связанными состояниями электромагнитных волн с фононами в ионных кристаллах @auxrussian@auxenglish@auxrussian@auxenglish[1], заряженные частицы которых неподвижны. Последнее свойство делает эти материалы изолирующими и обеспечивает беспрепятственное распространение электромагнитных коллективных мод. Иная ситуация в металлах, для которых характерно большое количество проводящих электронов, где электромагнитные волны могут распространяться только с частотами выше плазменной. Тем не менее поверхностные плазмоны [2] могут распространяться с частотами ниже края плазмы. Сильное взаимодействие света с поверхностными плазмонами создает поверхностные плазмон-поляритоны, которые, следовательно, являются частным случаем поляритонов, ограниченных границей раздела металл-диэлектрик или металл-воздух.

Фотонные наноструктуры могут повысить эффективность и функциональность оптоэлектронных устройств, контролируя распространение и вывод света в волноводах. Парадигматическим примером является выделение света путем согласования импульсов решетки и волноводной моды. Однако более высокая функциональность может быть достигнута за счёт сильной связи между волноводными и плазмонными модами. В статье [3] показано, что такие гибридные системы обеспечивают удобную стратегию настройки полосы дисперсии волновода. Контролируя высоту металлической решетки, полосы превращаются из конуса Дирака в плоскую полосу и параболический профиль. Показано, что применение этой системы к светоизлучающим волноводам, где плоская полоса приводит к чётко определённому конусу излучения, с увеличением эффективности излучения в 1.8 раза и коэффициентом Парселла 2.4. Показано, что 72.2 % всей излучаемой мощности содержится в области плоской полосы и в восемь раз больше, чем полное излучение диполя в однородной среде. Таким образом, система сочетает в себе повышение эффективности с возможностью формирования луча.

Настройка плазмонных ближних полей занимает центральное место в области нанофотоники. Детальное знание распределения поля имеет решающее значение для проектирования и изготовления плазмонных датчиков, детекторов, фотоэлектрических элементов, схем на основе плазмонов, наноманипуляторов, электрооптических плазмонных модуляторов и атомных устройств. В статье [4] сообщается о количественном сравнении между наблюдением в ближней зоне и численными расчетами с учётом распределения интенсивности для поперечной магнитной (TM) и поперечной электрической (TE) поляризаций, которые необходимы для создания устройств во всех этих областях. Представлены результаты сканирующей микроскопии в ближней зоне поверхностных плазмон-поляритонов, возбуждаемых линейно поляризованным светом на золотой решётке, изготовленной на основе нанотехнологий. Процесс оптимизации выполняется для инфракрасного света для применений в улавливании холодных атомов и плазмонном зондировании. Показано, что процессы накопления и распространения поверхностных плазмонных поляритонов и подтверждаем, что неплоскостная составляющая электрического поля не связана с зондом для ближнепольной сканирующей микроскопии апертурного типа.

В статье [5] рассмотрены ограниченные моды на границе раздела, произвольно наклоненной относительно оптических осей немагнитных анизотропных двумерных материалов. Развивая точные методы Винера-Хопфа и приближенные методы Феттера, исследована дисперсия краевых мод, распределения поля и плотности заряда. Двумерный слой описывается проводимостью лоренцевского типа в одном или обоих направлениях, что реалистично для природных анизотропных двумерных материалов и резонансных гиперболических метаповерхностей. Продемонстрировано, что из-за анизотропии кра-

евая мода существует только при волновых векторах, превышающих ненулевое пороговое значение, если край наклонен относительно направления резонансной проводимости. Преобладающий вклад в пространственные профили поля и плотности заряда дают затухающие двумерные волны, которые ограничены как в пространстве около двумерного слоя, так и вдоль слоя у его края. Степень ограничения поля вдоль слоя определяется волновым вектором или рассогласованием частот между краевой модой и континуумом свободно распространяющихся двумерных мод. Анализ подходит для различных типов поляритонов (плазмонных, фононных, экситонных поляритонов) При достаточно больших волновых векторах. Благодаря превосходному ограничению поля во всех направлениях, перпендикулярных краю, эти режимы выглядят многообещающими для современной плазмоники и сенсорики.

В статье [6] обсуждается физический процесс возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов на основе уравнения дисперсии поверхностных плазмон-поляритонов, связь с поверхностными плазмон-поляритонами за счёт согласования импульсов между фотонами и поверхностными плазмон-поляритонами и поведение поверхностных плазмон-поляритонов при распространении. Основываясь на физическом механизме и специфических свойствах поверхностных плазмон-поляритонов, продемонстрированы основные применения поверхностных плазмон-поляритонов, такие как волноводы, источники, ближнепольная оптика, рамановская спектроскопия с усилением поверхности, хранение данных, солнечные элементы, химические сенсоры и биосенсоры.

В статье [7] исследуется поляритонная зонная структура двумерных атомных решеток, связанных с однократным возбуждением поверхностной плазмон-поляритонной моды. Показана возможность реализации топологических щелей с разными числами Черна за счёт резонансных переходов атомов в возбужденные состояния с различным угловым моментом. Использован вычислительный метод, основанный на недавно предложенной технике отображения Дирихле-Неймана, которая точно моделирует немарковскую динамику, а также взаимодействия, включающие электрические и магнитные мультипольные переходы более высокого порядка. Разработаны топологически устойчивые краевые состояния, которые используются для достижения однонаправленного излучения и невзаимной передачи одиночных фотонов. Мы также указываем на проблемы в реализации полос с более высокими числами Черна в таких системах.

В статье [8] исследуется поляритонная зонная структура двумерной атомной решётки, связанной с модой поверхностного плазмон-поляритона в режиме однократного возбуждения. Применяется вычислительная техника на основе карты Дирихле-Неймана, которая может точно моделировать немарковскую динамику, а также особенности узкой полосы пропускания, связанные с любой периодической системой атом-фотон в целом. Используя эту технику, проектируем двумерную атомную решётку, используя только двухуровневые атомы, которая имеет изолированную плоскую поляритонную полосу, где величина групповой скорости для мод в полосе приближается к нулю во всей зоне Бриллюэна. Такую систему можно использовать для замедления, хранения и управления одиночными фотонами в двумерной геометрии.

Субволновые плазмонные провода обеспечивают очень простую, сверхкомпактную и эффективную платформу для активной плазмоники. В статье [9] теоретически исследована прозрачность с магнитным переключением в полупроводниковых проводах субволновой длины. Основная трудность, ограничивающая производительность магнитоплазмонных устройств и субволновых оптических изоляторов, заключается в необходимости использования сильного магнитного поля. Обнаружено, что требуемая напряженность магнитного поля в полупроводниковых проводах субволновой длины в два раза выше, чем в плоских границах раздела полупроводников, и определяется подвижностью носителей в составляющем полупроводнике и не зависит напрямую от других

параметров материала, таких как диэлектрическая проницаемость покрытия, полупроводник. плотность носителей и эффективная масса электрона. Азимутальное магнитное поле может быть возбуждено постоянным электрическим током или оптической накачкой через полупроводниковые провода. Наш вывод указывает на важные ограничения производительности активных плазмонных устройств, основанные на магнитооптической прозрачности плазмонных проводов.

Поверхностные плазмон-поляритоны из-за их субволновой природы могут значительно изменять поведение электронных переходов в различных оптоэлектронных системах. Здесь, используя модельную систему со сферической квантовой точкой вблизи плоской поверхности металла, в статье [10] показано, что обычные запрещенные оптические переходы в квантовой точке могут быть в значительной степени обеспечены спонтанным распадом поверхностного плазмон-поляритона. Электронные состояния квантовой точки аппроксимируются блоховским состоянием в сочетании с волновыми функциями в сферической потенциальной яме, что обеспечивает множественные дырочные состояния со смешанными электронными мультиполями. Более того, поверхностный плазмон-поляритон квантуется с использованием схемы канонического квантования, за которой следует подход, основанный на функциях Грина, для введения его диссипации. В частности, обнаружено, что, когда учитывается диссипация поверхностных плазмон-поляритонов, спонтанный распад соответствующего экситона квантовой точки преобладает за счет перехода в нерезонансный режим поверхностных плазмон-поляритонов с большими импульсами. Также изучалась зависимость скорости спонтанного распада от размера и кристаллической ориентации квантовой точки, расстояния между квантовой точкой и поверхностью металла и ширины линии поверхностных плазмон-поляритонов. Были обнаружены некоторые полезные скейлинговые соотношения, и обнаружено, что мультипольные переходы сравнимы с дипольными переходами при определённых параметрах системы. Эти открытия имеют важное значение для нашего понимания электронного перехода в ближнем поле металла и могут оказаться полезными для будущего дизайна устройств с плазмонными точками и квантовыми точками.

В статье [11] предложена схема нелинейной оптико-магнитной манипуляции для реализации захвата поверхностных плазмон-поляритонов с низкими потерями в волновод металл-диэлектрик-металл на основе двойной электромагнитно-индуцированной прозрачности и кросс-фазовой модуляции. За счёт некогерентной накачки компенсируются омические потери поверхностных плазмон-поляритонов. Огромная нелинейность в системе уравновешивает дифракцию поверхностных плазмон-поляритонов, и получается солитон поверхностных плазмон-поляритонов. С помощью солитонов поверхностных плазмон-поляритонов реализуем захват других более слабых поверхностных плазмон-поляритонов посредством кросс-фазовой модуляции. Обнаружили, что захваченные поверхностные плазмон-поляритоны имеют такой же профиль, как и более сильные поверхностные плазмон-поляритоны, таким образом, профиль захваченных поверхностных плазмон-поляритонов можно контролировать, даже если их можно сфокусировать, когда они разряжены. Показано, что поверхностные плазмон-поляритоны будут отклоняться во внешнем градиентном магнитном поле, и траекторией поверхностных плазмон-поляритонов можно динамически управлять, регулируя градиент магнитного поля. Полученные здесь результаты могут иметь большой потенциал в будущих схемах на кристалле.

В статье [12] представлены физические характеристики простой волноводной структуры, построенной на основе анизотропного двулучепреломляющего кристалла-металла-хиральной среды, короче говоря, анизотропного металлического хирала, и раскрываем хирально-зависимые свойства дисперсии и распространения поверхностных плазмон-поляритонов. Продемонстрирована его беспрецедентная способность различать вели-

чину и знак как действительной, так и мнимой части параметра хиральности. Анизотропия играет ключевую роль в таких характеристиках и демонстрирует настраиваемую способность в энантиомерной дискриминации, даже когда параметр хиральности является комплексным. Наиболее важно то, что физическое происхождение хиральной дискриминации проистекает из внешней хиральности системы, которая возникает из-за взаимной ориентации поверхностных плазмон-поляритонов и оптической оси. Более того, также проясняется фундаментальная физика, лежащая в основе поведения кирального зондирования, связывая внутренний квантовый спиновый эффект Холла поверхностных плазмон-поляритонов с анализом электромагнитного поля. Эта структура не требует сложного изготовления, но обеспечивает возможность поверхностно-чувствительного биодатчика на чипе.

В статье [13] сообщается об значительном усилении магнитооптического эффекта Фарадея в двумерной магнитоплазмонной решётке с квадратной решёткой. Структура состоит из диэлектрической магнитной пленки Bi-замещённого феррита-граната малой толщины (100 нм), покрытой перфорированным слоем золота. Экспериментально и теоретически показано усиление фарадеевского вращения примерно в два раза, несмотря на подавление волноводных мод. Это происходит в первую очередь за счёт возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся на границе раздела Au-гранат в двух ортогональных направлениях вдоль векторов решётки плазмонной решётки.

Последнее десятилетие стало свидетелем многочисленных открытий двумерных полуметаллов и диэлектриков, в то время как двумерные металлы идентифицировались редко. Борофен, однослойный лист бора, недавно стал идеальным двумерным металлом с уникальными электронными свойствами. В статье [14] изучается коллективные возбуждения в борофене, которые демонстрируют две основные плазмонные моды с низкими скоростями затухания, простирающимися от инфракрасного до ультрафиолетового режима. Анизотропный одномерный плазмон возникает из-за электронных переходов наклонных конусов Дирака в борофене, аналогично тому, как это происходит в чрезвычайно легированном графене. Эти особенности делают борофен интегрированной платформой для одномерных, двумерных плазмонов и плазмонов Дирака, многообещающей для направленного переноса поляритонов и широкополосной оптической связи в оптоэлектронных устройствах следующего поколения.

В статье [15] исследованы поверхностные плазмон-поляритоны в напряжённой пластине полуметалла Вейля с нарушенной симметрией относительно обращения времени. Обнаружено, что индуцированное деформацией осевое калибровочное поле снижает частоты этих коллективных мод для промежуточных значений волнового вектора. В зависимости от относительной ориентации разделения узлов Вейля в импульсном пространстве, нормали к поверхности и направления распространения, дисперсионное соотношение поверхностных плазмон-поляритонов может быть невзаимным даже в тонкой пластине. Кроме того, вызванные деформацией аксиальные калибровочные поля могут существенно влиять на свойства локализации коллективных мод. Эти эффекты позволяют контролировать распространение поверхностных плазмон-поляритонов в полуметаллах Вейля на месте и могут быть полезны для создания невзаимных устройств.

В статье [16] показано, что оптические антенны обеспечивают эффективную связь между распространяющимся светом и связывающими электромагнитными волнами, такими как поверхностные плазмон-поляритоны. При освещении неоднородными оптическими полями распространяющиеся поверхностные плазмон-поляритоны, опосредованные многомодовыми антеннами, могут быть пространственно асимметричными, и эта асимметрия сильно зависит от положения антенн относительно поля освещения. Развивается такое асимметричное возбуждение поверхностных плазмон-поляритонов пу-

тём освещения пары щелевых антенн Эрмита-Гаусса лучом с модой $(1, 0)$. Физический сценарий взаимодействия между освещающим оптическим полем и парными щелевыми антеннами разработан с помощью полноволнового электромагнитного моделирования. Также описаны эксперименты по отслеживанию распространения асимметричных поверхностных плазмон-поляритонов с помощью техники визуализации в задней фокальной плоскости. Путём восстановления асимметричного отношения интенсивностей структуры поверхностных плазмон-поляритонов в изображении задней фокальной плоскости демонстрируется боковое смещение антенн до ангстремного уровня.

В статье [17] показано, что нетривиальная топология в объёмном веществе связана с существованием топологически защищённых межфазных состояний. Показано, что газовый плазмон-поляритон, электромагнитная поверхностная волна, существующая на границе замагниченной плазмы и вакуума, имеет топологическое происхождение, которое возникает из нетривиальной топологии замагниченной плазмы. Поскольку газовая плазма не может поддерживать резкую границу раздела с прерывистой плотностью, необходимо учитывать постепенное падение плотности с масштабом, сравнимым или большим, чем длина волны. Показано, что газообразный плазмон-поляритон может быть обнаружен в запрещенном спектре в современных лабораторных устройствах, предполагая, что в настоящее время доступны платформы для экспериментального исследования физики топологических волн в плазме.

В статье [18] предложен механизм преобразования углового момента из поперечного оптического спина в поверхностных плазмон-поляритонах в спин электрона проводимости. Свободные электроны в металле следуют за поперечно вращающимся электрическим полем поверхностного плазмон-поляритона, и возникающие орбитальные движения создают неоднородную статическую намагниченность в металле. Решая уравнение спиновой диффузии в поверхностном плазмон-поляритоне, обнаружено, что поле намагниченности генерирует электронный спиновый ток. Показано, что существует резонансное состояние, при котором спиновый ток резонансно усиливается, а поляризация спинового тока переворачивается. Теория раскрывает альтернативную функцию поверхностных плазмон-поляритонов как источника спинового тока.

Равенство между спектральным направленным излучением и поглощательной способностью объекта при локальном термодинамическом равновесии известно как закон излучения Кирхгофа. Нарушение закона излучения Кирхгофа физически разрешено нарушением симметрии обращения времени и может открыть возможности для невзаимных излучателей и поглотителей света. Ожидается, что большая аномальная холловская проводимость и угол наклона, недавно обнаруженные в топологических полуметаллах Вейля, особенно в магнитных полуметаллах Вейля первого типа и полуметаллах Вейля второго типа, создадут большое невзаимное распространение электромагнитных волн. В статье [19] сосредотачиваются на магнитных полуметаллах Вейля первого типа и показываем с помощью моделирования и моделирования, что невзаимные поверхностные плазмон-поляритоны могут приводить к выраженной невзаимности без внешнего магнитного поля. Моделирование в этой работе начинается с одной пары узлов Вейля, за которой следует более реалистичная модель с несколькими парными узлами Вейля. Поверхностные состояния ферми-дуги также учитываются через поверхностную проводимость. В статье [19] указано на многообещающую применимость топологических полуметаллов Вейля для магнитооптических и энергетических приложений.

В статье [20] проведено квантование графеновых плазмонов, используя как макроскопический подход, основанный на классическом выражении для средней электромагнитной энергии в диэлектрической среде, так и квантовую гидродинамическую модель, в которой электроны графена моделируются как заряженная жидкость. Обе модели позволяют учесть дисперсию оптического отклика, а гидродинамическая модель также

позволяет учесть импульсную зависимость оптического отклика (нелокальные эффекты). Используя оба метода, модовые функции электромагнитного поля и соответствующие частоты определяются для двух различных структур графена. Показано, как квантовать графеновые плазмоны, учитывая, что графен является диспергирующей средой, в рамках локального и нелокального описания. Обнаружено, что дисперсия оптического отклика графена приводит к нетривиальному условию нормировки модовых функций. Полученные модовые функции затем используются для расчёта распада эмиттера, представленного диполем, через возбуждение поверхностных плазмон-поляритонов графена. Полученные результаты сравниваются с полной скоростью спонтанного распада излучателя, и обнаруживается почти идеальное совпадение в соответствующем спектральном диапазоне. Обнаружено, что нелокальные эффекты в проводимости графена становятся актуальными для скорости излучения при малых энергиях Ферми и малых расстояниях между диполем и листом графена.

В статье [21] исследованы поверхностные плазмон-поляритоны в плоских сверхрешётках графена с одномерной периодической модуляцией запрещённой зоны. Межминизонный вклад в оптическую проводимость этой системы был найден методом уравнения движения для двух случаев: уровень Ферми попадает в одну из мини-щелей, а уровень Ферми находится в одной из мини-зон. Было показано, что в этих случаях оптическая проводимость системы существенно меняется. Спектры поверхностных плазмон-поляритонов в системе для них различаются.

В статье [22] показано, что ослабленное полное отражение поверхностным плазмон-поляритоном представляет собой метод оценки дисперсионного отношения поверхностного плазмон-поляритона по положению провала в спектре отражения. Однако недавние исследования показали, что провалы смещены из резонанса поверхностного плазмон-поляритона, потому что они вызваны типом резонанса Фано, то есть интерференцией между процессом резонансного отражения, сопровождающимся резонансным возбуждением поверхностного плазмон-поляритона, и процессом прямого отражения без резонансное возбуждение. Этот результат свидетельствует о том, что свойства системы, которые трудно достичь в дисперсионном соотношении поверхностного плазмон-поляритона, можно охарактеризовать с помощью метода ослабленного полного отражения. В работе [22] исследуется влияние шероховатости поверхности из-за наноразмерных ямок, созданных на начальной стадии питтинговой коррозии, на спектр ослабленного полного отражения с точки зрения резонанса Фано. Используя метод временных связанных мод, показано, что резонанс Фано при ослабленном полном отражении вызван изменением фазы прямого отражения из-за поглощения на поверхности металла, и форма спектра определяется этой фазой, наряду с отношение скорости внешнего (радиационного) распада к полной скорости распада резонансной моды. Кроме того, поясняется, что скорости внутреннего и внешнего затухания, извлеченные из спектра ослабленного полного отражения, предоставляют информацию о коррозии, такую как эффективная толщина металлической плёнки и случайность в распределении ямок.

В статье [23] дисперсионное расширение резонансных состояний, разработанное для точного расчета резонансных состояний в открытых оптических системах с частотной дисперсией, применяется здесь к реалистичным материалам, таким как металлические наночастицы и полупроводниковые микросферы. Диэлектрическая проницаемость материала определяется путём подгонки измеренных показателей преломления и поглощения с обобщенной моделью Друде-Лоренца, содержащей несколько полюсов в комплексной частотной плоскости. Каждый полюс Друде или Лоренца порождает бесконечную серию резонансных состояний. Более того, для небольших наночастиц каждый из этих полюсов создаёт особую моду поверхностного плазмон-поляритона. Эволюция этих множественных поверхностных мод с увеличением радиуса отслеживает переход от

электростатического предела к значительному замедлению и излучению. При рассмотрении диапазона оптических фононов в полупроводниковой микросфере обнаружена полоса остаточных лучей, разделяющая резонансные состояния. Учитывая небольшой диапазон энергий вокруг запрещённой зоны полупроводника, переход от поглощения к усилению описывается инвертированием веса полюса Лоренца, что приводит к образованию резонансных состояний генерации. Интересно, что серия резонансных состояний, сходящихся к полюсу поглощения со стороны более низкой частоты, изменяет форму полюса усиления в петлю по часовой стрелке, приближающуюся к полюсу со стороны более высокой частоты, будучи отделенной от серии, охватывающей от низких до высоких частот и содержащей генерацию режимы.

В статье [24] показано, что оптические поля, усиленные поверхностными плазмон-поляритонами на границах раздела металл-диэлектрик, полезны для увеличения нескольких взаимодействий света с веществом, и применение в нелинейной оптике является одним из наиболее важных применений структуры этого типа. В большинстве предыдущих исследований по этой теме использовалась нелинейная восприимчивость металлических поверхностей. Однако ограниченная длина взаимодействия света с веществом в нелинейной оптике не позволила перевести технологии в практическое использование. В статье [24] предпринята попытка решить эту проблему путём выращивания тонких полимерных плёнок нелинейной оптики на металлических поверхностях. Нелинейные оптические отклики системы были охарактеризованы спектроскопией генерации второй гармоники. Экспериментальные результаты показали, что оптические поля, усиленные поверхностным плазмон-поляритоном, вызывают не только поверхностные нелинейности в серебре, но и объёмные нелинейности в полимере для нелинейной оптики. Для преобразований генерации второй гармоники была оптимальная толщина полимера, и большая толщина не всегда приводила к более высокому преобразованию. Максимальная эффективность преобразования была примерно в 40 раз выше, чем у незащищенной поверхности серебра, не покрытой полимером. Рост и распространение волн генерации второй гармоники рассматривались с помощью численного подхода, сочетающего метод матрицы переноса и анализ функций Грина. Эффективность преобразования генерации второй гармоники определялась тремя факторами: коэффициентом усиления поля поверхностных плазмон-поляритонов, длиной нелинейного взаимодействия света с веществом и степенью интерференции между распространяющимися вперед и назад волнами генерации второй гармоники. Последние два фактора в основном определяли оптимальную эффективность преобразования генерации второй гармоники. Предлагаемая стратегия гибридизации полимеров для нелинейной оптики приближает к практическому использованию нелинейной плазмоники.

Магнитные материалы в различных металлических наноструктурах позволяют внешнему магнитному полю легко управлять распространением поверхностных плазмон-поляритонов и модами поверхностной решётки, что увеличивает величину магнитооптического отклика. В статье [25] экспериментально и численно показано, что различное по своей сути радиационное затухание тёмных и ярких поверхностных мод решётки в одномерных многослойных магнитоплазмонных кристаллах Au/Ni/Au с низкими потерями может изменять резонансное усиление поперечного магнитооптического эффекта Керра. С увеличением добротности мод темной поверхностной решетки максимальные значения поперечного магнитооптического эффекта Керра также увеличиваются. Спектральный диапазон усиления поперечного магнитооптического эффекта Керра расширяется при малых углах падения, так как тёмные и светлые поверхностные моды решётки накладываются друг на друга. Модель резонанса Фано показывает, что сдвиг длины волны темной и яркой мод приводит к резонансному усилению поперечного магнитооптического эффекта Керра.

В статье [26] построена модель, описывающая отклик гибридной системы, в которой электромагнитное поле – в частности, поверхностные плазмон-поляритоны – сильно взаимодействует с электронными возбуждениями атомов или молекул. Подход основан на теории ввода-вывода квантовой оптики и, в частности, учитывает тепловые и квантовые колебания молекул. Последний описан в $P(E)$ теории, аналогичная используемой в теории динамической кулоновской блокады. В результате можем учесть влияние молекулярного стоксова сдвига на сильно связанный отклик системы. Наша модель затем учитывает асимметричное излучение верхней и нижней поляритонных мод. Это также позволяет точно описать частичную декогеренцию светового излучения сильно связанной системы. Результаты могут быть легко использованы для связывания реакции гибридных мод с эмиссионными и флуоресцентными свойствами отдельных молекул и, таким образом, важны для понимания любого использования таких систем, таких как когерентный сбор света.

В статье [27] была продемонстрирована эффективная электрооптическая модуляция с использованием режима краевого плазмона, специфичного для гибридного плазмонного волновода. Подход устраняет главное препятствие интегрированной микроволновой фотоники, вызванное поляризационными ограничениями как активных, так и пассивных компонентов. В дополнение к ограничению субволновой длины, типичному для поверхностных плазмон-поляритонов, режимы краевого плазмона позволяют точно согласовывать требования к поляризации для кремниевых решётчатых элементов связи, волноводов и электрооптических модуляторов на основе кремния. Концепция гибридного волновода, реализованная в виде сэндвич-структуры, подразумевает связь распространяющихся плазмонных мод с волноводной модой. Вертикально расположенный сэндвич включает тонкий слой материала с близким к нулю значениями диэлектрической проницаемости (оксид индия и олова), обеспечивающий эффективную модуляцию при малых масштабах длины. Используемые краевые плазмоны обладают смешанным поляризационным состоянием и могут возбуждаться горизонтально поляризованными волноводными модами. Это позволяет результирующему модулятору работать напрямую с эффективными решетчатыми элементами связи и избегать использования громоздких преобразователей поляризации с потерями. Разработана трехмерная оптическая модель, основанная на уравнениях Максвелла в сочетании с уравнениями дрейфа-диффузии полупроводников. Были выполнены тяжёлые численные расчёты, связанные с оптимизацией материалов и геометрии. Вычисляются и анализируются эффективные моды, стационарное распределение поля, коэффициент экстинкции, оптические потери и свойства переноса заряда. Помимо поляризационного согласования, преимущества предложенной модели включают компактную плоскую геометрию кремниевого волновода, пониженное активное электрическое сопротивление и относительно простую конструкцию, привлекательную для экспериментальной реализации.

В области нанофотоники уже давно предпринимаются попытки определить механизмы для реализации динамического управления оптическими модами. В большинстве подходов величина настройки зависит от степени податливости оптической диэлектрической проницаемости при некоторых изменениях материала, таких как концентрация носителей. В статье [28] посредством многоволнового рамановского спектроскопического исследования наностолбиков 4H-SiC, импульс определён как альтернативное средство для улучшения спектральной перестройки нанофотонных мод из-за пространственной дисперсии, заложенной в инфракрасной оптической проницаемости полярных полупроводников.

В статье [29] введён класс частично когерентных полей поверхностных плазмон-поляритонов, несущих оптические вихри, генерируемых разумной суперпозицией плоских поверхностных плазмон-поляритонов с заданным начальным распределением фа-

зы и произвольными корреляциями на границе раздела металл-воздух. Мы исследуем глобальную степень когерентности, плотности энергии, потоки энергии, орбитальные и спиновые угловые моменты, а также состояния поляризации таких частично когерентных поверхностных плазмон-поляритонных вихревых полей в терминах их когерентного модового представления. Основные физические характеристики этих вихревых полей поверхностных плазмон-поляритонов могут быть широко настроены путём управления составляющими корреляциями поверхностных плазмон-поляритонов, адаптируя такие вихревые поля поверхностных плазмон-поляритонов к желаемым приложениям в статистической наноплазмонике.

В статье [30] исследован подход для наноразмерного пространственно неоднородного возбуждения квазистатических магнитных полей с помощью индуцированного плазмоном обратного эффекта Фарадея в покрытых графеном полупроводниках, а также представляем аналитические и численные результаты для распределения индуцированного магнитного поля. Предполагается, что эффективное магнитное поле достигнет примерно 1 Тл, а направление магнитного поля может переключаться поверхностными плазмон-поляритонами, распространяющимися в противоположном направлении. Путём электрического управления химическим потенциалом графенового листа можно широко регулировать пространственную неоднородность ближнего поля намагниченности. Отклик наведённой намагниченности на распространение плазмона проявляется в виде нелинейного фазового сдвига, который можно измерить в дальней зоне. Используя теорему взаимности Лоренца, аналитически рассчитали нелинейную восприимчивость и коэффициент нелинейного поглощения в зависимости от химического потенциала, частоты и других параметров материала. Плазмонный обратный эффект Фарадея и нелинейность могут быть очень сильными за счёт уменьшения химического потенциала, которым можно гибко управлять с помощью напряжения затвора графена. Исследуемая система может проложить путь к альтернативному подходу к нанометровому пространственному полностью оптическому контролю намагниченности.

В статье [31] была решена каноническая краевая задача для поверхностных плазмон-поляритонных волн, направляемых плоской границей раздела диэлектрического материала и плазмонного материала для случаев, когда любой партнерский материал мог быть одноосным материалом с оптической осью, лежащей в плоскости границы раздела. Численные исследования показали, что две разные поверхностные плазмон-поляритонные волны с разными фазовыми скоростями, длинами распространения и глубиной проникновения могут распространяться в заданном направлении в плоскости границы раздела. Напротив, плоская граница раздела изотропных материалов-партнеров поддерживает только одну поверхностную плазмон-поляритонную волну для каждого направления распространения. Кроме того, для уникального направления распространения в каждом квадранте плоскости границы раздела было продемонстрировано, что может существовать нетрадиционный тип поверхностной плазмон-поляритонной волны, называемой поверхностной плазмон-поляритонной волной Фойгта. Поля этих поверхностных плазмон-поляритонных волн Фойгта затухают как произведение линейной и экспоненциальной функций расстояния от границы раздела в анизотропном материале-партнере. Напротив, поля обычных поверхностных плазмон-поляритонных волн затухают только экспоненциально с расстоянием от границы раздела. Существуют явные аналитические решения дисперсионного уравнения для поверхностных плазмон-поляритонных волн Фойгта, которые помогают установить ограничения на режимы определяющих параметров для материалов-партнеров, которые поддерживают распространение поверхностных плазмон-поляритонных волн Фойгта.

В статье [32] показано, что оптические материалы демонстрируют значительные потери на резонансной частоте составляющих их атомов, поэтому они практически при-

меняются на частотах, далеких от размерных резонансов. Электромагнитно-индуцированная прозрачность обеспечивает метод эффективного подавления оптических потерь в узком окне над оптическим резонансом, где среда демонстрирует значительную дисперсию, но за счёт нулевой восприимчивости. Классические или плазмонные аналоги эффекта электромагнитно-индуцированной прозрачности вводятся и широко используются в контексте электромагнитных или оптических метаматериалов. В другом интересном явлении в квантовой оптике, известном как увеличение показателя преломления, оптические потери среды могут быть нулевыми или даже отрицательными в области максимальной восприимчивости и незначительной дисперсии. Это условие интересно для приложений, где требуется сильный электромагнитный отклик среды с незначительными потерями, например, для метаматериалов с нулевым или отрицательным показателем преломления. Здесь введён плазмонный аналог увеличения показателя преломления, который позволяет когерентно управлять поляризуемостью и поглощением плазмонных наноантенн. Это может открыть путь для распространения оптических волн с компенсацией потерь в плазмонных метаматериалах с нулевым показателем преломления и высоким показателем преломления. Схема также предлагает подход к полностью оптическому переключению и когерентному управлению свойствами пропускания, дифракции и поляризации плазмонных наноструктур, а также свойствами распространения поверхностных плазмон-поляритонов на метаповерхностях.

В статье [33] теоретически и экспериментально исследованы характеристики отражения поверхностного плазмон-поляритона прямоугольным выступом на поверхности серебра. Амплитуда и фазовый сдвиг отражения поверхностного плазмон-поляритона прямоугольным гребнем были рассчитаны по теории рассеяния поверхностных плазмон-поляритонов с использованием метода тензора Грина и выражены через ширину гребня и энергию поверхностного плазмон-поляритона. Было обнаружено, что этот результат расчёта может быть хорошо воспроизведен простой моделью, выраженной наложением отражений от двух ступеней, составляющих гребень. Изготовлен одномерный резонатор, состоящий из пары прямоугольных выступов, и впервые уточнены характеристики режима стоячей волны поверхностного плазмон-поляритона (мода резонатора) с помощью сканирующего просвечивающего электронного микроскопа – метода катодолюминесценции и использованы для оценки теоретические расчеты коэффициента отражения. Энергии мод резонатора выводятся из спектральной картины с угловым разрешением, а фазовый сдвиг отражения поверхностных плазмон-поляритонов может быть вычислен через состояние резонатора. Объяснена резонансная энергия моды резонатора и пространственное распределение стоячей волны поверхностного плазмон-поляритона, используя полученный теоретически коэффициент отражения поверхностного плазмон-поляритона от прямоугольного гребня.

В статье [34] показано, что благодаря сверхкоротким временам переноса баллистических электронов динамика релаксации горячих неравновесных электронов традиционно считается локальной. Используя распространяющиеся поверхностные плазмон-поляритоны в гетероструктурах металл-диэлектрик, мы демонстрируем, что как локальная (релаксационная), так и нелокальная (транспортная) динамика горячих электронов вносят вклад в переходный оптический отклик. Данные, полученные в двух различных сериях экспериментов с накачкой и зондом, демонстрируют сильное увеличение как эффективности генерации нетепловых электронов, так и нелокальных времен релаксации при поверхностном плазмон-поляритонном резонансе. Разработана простая кинетическая модель, включающую возбуждение поверхностного плазмон-поляритона, в которую включены как локальная, так и нелокальная электронная релаксация в металлах, и анализируем динамику неравновесных электронов в целом в случае коллективных электронных возбуждений. Результаты проливают свет на роль поверхностных

плазмон-поляритонов в неравновесной электронной динамике и демонстрируют широкие перспективы сверхбыстрой плазмоники для настройки пространственно-временного распределения горячих электронов в металлических наноструктурах.

Взаимодействия света и вещества в обычных нанофотонных структурах обычно не имеют направленности. Например, в отличие от микроволновых антенных систем, большинство оптических излучателей (например, возбужденные атомы / молекулы и простые наноантенны) демонстрируют квазиизотропные диполярные диаграммы направленности с низкой направленностью. Кроме того, поверхностные волны, поддерживаемые традиционными материальными подложками, обычно не имеют предпочтительного направления распространения, и их волновой фронт имеет тенденцию распространяться по мере распространения по поверхности, если только поверхность или возбуждение не спроектированы и структурированы должным образом. В статье [35] теоретически продемонстрирована возможность реализации однонаправленных и бездифракционных поверхностных плазмон-поляритонных мод на невзаимной платформе — гиротропной намагниченной плазме. Основываясь на строгом подходе к функциям Грина, обеспечиваем всесторонний и систематический анализ всех доступных физических механизмов, которые могут придавать системе направленность, как в смысле одностороннего возбуждения поверхностных волн, так и в смысле направленного бездифракционного распространения вдоль поверхность. Рассматриваемые механизмы включают в себя влияние сильной и слабой форм невзаимности, эллиптическую или гиперболическую топологию модальных дисперсионных поверхностей и состояние поляризации источника с связанной возможностью кирального возбуждение поверхностной волны, управляемое синхронизацией углового момента. Обнаружили, что трёхмерные гиротропные плазмонные платформы поддерживают ранее незамеченный режим распространения волн, который демонстрирует несколько из этих физических механизмов одновременно, что позволяет теоретически продемонстрировать однонаправленные поверхностные плазмон-поляритонные моды, которые распространяются как единый сверхузкий бездифракционный пучок. Оценивается также влияние диссипации и нелокальных эффектов. Теоретические открытия могут позволить создать новое поколение плазмонных структур и устройств с сильно направленным откликом.

В статье [36] сообщается о связи электрического квадрупольного перехода в атомном паре с плазмонным возбуждением в наноструктурированном металлическом метаматериале. Квадрупольный переход на 685 нм в газе атомов цезия оптически накачивается, в то время как индуцированное истощение населенности основного состояния исследуется с помощью света, настроенного на сильный электрический дипольный переход на 852 нм. Использовано селективное отражение для разрешения бездоплеровской сверхтонкой структуры атомов цезия. Наблюдается сильная модификация спектров отражения в присутствии метаматериала и обсуждаем роль пространственного изменения поверхностного плазмон-поляритона на квадрупольную связь.

В последние годы большой интерес вызывает преобразование света, несущего спиновый угловой момент, в вихри оптического поля, несущие орбитальный угловой момент. Взаимодействие между двумя оптическими полями, каждое из которых несет одну из этих степеней свободы, и, кроме того, передача результирующего произведения углового момента материи редко обсуждаются. В статье [37] измерено взаимодействие между трёхмерным световым аксиальным спиновым угловым моментом и двумерными плазмон-поляритонными вихрями, несущими поперечный орбитальный угловой момент высокого порядка. Взаимодействие опосредуется двухфотонным поглощением на поверхности золота, запечатлевая результирующее смешение углового момента в материи путем возбуждения электронов, которые фотоэмиссируются в вакуум. Интересно, что пространственное распределение испускаемых электронов несёт в себе признак вычита-

ния спина из угловых моментов орбиты. В статье [37] экспериментально и теоретически показано, что поглощающий характер этого взаимодействия приводит как к одиночному, так и к двойному фотонно-плазмонному смешиванию углового момента за счёт однофотонного и двухфотонного взаимодействий. Результаты демонстрируют взаимодействия света с веществом по угловым моментам высокого порядка, дают представление о конкретных маршрутах электронного возбуждения и могут быть применены в будущих электронных источниках и когерентном управлении.

В статье [38] исследовано возбуждение поверхностных плазмон-поляритонных волн на границе раздела металла и одномерного фотонного кристалла вдоль направления периодичности фотонного кристалла в призматической конфигурации. Для постановки задачи использовался строгий подход связанных волн, и спектры поглощения были получены в зависимости от угла падения, периода и толщины фотонного кристалла. Корреляция полос поглощения с основной канонической проблемой и пространственными профилями мощности подтвердила возбуждение поверхностных плазмон-поляритонных волн. Возбуждение поверхностных плазмон-поляритонных волн на границе одномерного фотонного кристалла вдоль направления периодичности открывает новые возможности для приложений.

Процессы рассеяния сыграли решающую роль в развитии квантовой теории. В области оптики фазовые сдвиги рассеяния использовались для выявления интересных форм взаимодействия света и вещества. В статье [39] исследуется фазовый сдвиг, испытываемый одиночным фотоном при его рассеянии на поверхностный плазмон-поляритон и наоборот. Этот сдвиг фазы связи особенно важен для квантовых плазмонных экспериментов. Таким образом, мы демонстрируем, что фотон-плазмонное взаимодействие на плазмонной щели можно моделировать с помощью квантовомеханического триттера, шестипортового рассеивающего элемента. В статье [39] показано, что видимости интерференционных картин с двумя и тремя щелями являются удобными наблюдаемыми объектами для характеристики взаимодействия на щели и определения фазы связи. Точная и простая модель взаимодействия, подтвержденная симуляциями и экспериментами, имеет важное значение не только для квантовых плазмонных эффектов интерференции, но также полезна для классических приложений.

Недавние предложения и достижения в области квантового моделирования, квантовой криптографии и квантовых коммуникаций в значительной степени полагаются на формирование квантовой запутанности. Вопреки общепринятому мнению, что диссипация разрушает квантовую когерентность, взаимодействие с диссипативной средой также может создавать запутанность. В статье [40] рассматривается система, состоящая из двух кубитов с квантовыми точками, соединённых с общей затухающей модой поверхностных плазмонов; каждая квантовая точка также связана с отдельной модой фотонного резонатора. Расчеты квантовой электродинамики резонатора показывают, что при оптическом возбуждении фемтосекундным лазерным импульсом происходит запутывание экситонов квантовых точек и временная эволюция парной корреляционной функции $g^{(2)}$ фотонов резонатора. является индикатором запутанности. Показано, что степень запутанности сохраняется во время эволюции системы. Кроме того, если связь мод фотонного резонатора и квантовых точек достаточно велика, запутанность квантовых точек может быть передана модам резонатора для увеличения общего времени жизни запутывания. Последнее явление можно рассматривать как признак запутанного долгоживущего образования экситон-поляритонов с квантовыми точками. Сохранение полной запутанности в пределе сильной связи взаимодействий полость-квантовая точка предлагает новые средства хранения запутанности и манипулирования ею в высококачественных оптических резонаторах.

В статье [41] показано, что оптическое связывание позволяет создавать механиче-

ски стабильные конфигурации наночастиц за счёт формирования самосогласованных оптических потенциалов захвата. В то время как классический дифракционный предел препятствует достижению расположения глубоко субволновых длин, вспомогательные наноструктуры позволяют настраивать оптические силы через дополнительные каналы взаимодействия. Подробно проанализирована конфигурация димера рядом с поверхностью металла, и было обнаружено, что вклад поверхностных плазмон-поляритонных волн определяет динамику взаимодействия. Показано, что канал взаимодействия, опосредованный резонансными поверхностными волнами, позволяет получать субволновые стабильные димеры. Кроме того, векторная структура поверхностных мод позволяет связываться между двумя дипольными наночастицами вдоль направления их дипольных моментов, в отличие от связывания в вакууме, где стабильная конфигурация формируется в направлении, перпендикулярном поляризации дипольных моментов. Кроме того, предсказывается увеличение на один порядок жесткости оптического связывания за счёт канала взаимодействия поверхностных плазмон-поляритонов. Эти явления открывают путь для разработки новых гибких оптических манипуляторов, позволяющих управлять траекторией наночастиц на субволновых масштабах и открывающих возможности для оптически индуцированной анизотропной (то есть с разными периодами как вдоль поляризации поля, так и перпендикулярно ей) организации частиц. на плазмонной подложке.

В статье [42] продемонстрировано нелинейное излучение из молекулярных слоёв, сильно связанных с протяженными световыми полями в массивах плазмонных наночастиц при наличии структурных дефектов. Гибридные состояния легкой материи, известные как плазмон-экситонные поляритоны, образуются за счёт сильной связи экситонов Френкеля в молекулах с резонансами поверхностной решётки. Эти резонансы являются результатом радиационного взаимодействия локализованных поверхностных плазмон-поляритонов в наночастицах серебра, усиленного дифракцией на массиве. Создавая массивы с различными постоянными решётки, показано, что частота нелинейного излучения определяется исключительно релаксацией экситонных поляритонов через колебательные кванты в молекулах. Также наблюдается дальнодействующая пространственная когерентность в образцах, что подтверждает объяснение в терминах нелинейного коллективного излучения сильно связанных плазмон-экситонных поляритонов. В отличие от недавних наблюдений экситон-поляритонной генерации и конденсации в органических системах, фотонные моды играют незначительную роль на частоте излучения в такой системе, и это излучение имеет неопределённый импульс из-за структурных недостатков. Этот замечательный результат показывает богатую и отличную физику сильно связанных органических молекул с фотонными полостями.

В статье [43] разработан класс вариационных схем гидродинамически-электродинамической модели газа свободных электронов без потерь на квазинейтральном фоне для качественного моделирования поверхностных плазмон-поляритонов. Установлена плотность лагранжиана газа свободных электронов без потерь с самосогласованным электромагнитным полем, и динамические уравнения с соответствующими ограничениями получены с помощью вариационного принципа. На основе дискретного внешнего исчисления функционал действия этой системы дискретизируется и минимизируется для получения дискретной динамики. Итерация Ньютона-Рафсона и метод стабилизации двусопряженного градиента используются как гибридный нелинейно-линейный алгебраический решатель. Вместо дискретизации уравнений в частных производных вариационные схемы обладают лучшими числовыми свойствами в секулярном моделировании, поскольку они сохраняют дискретную лагранжеву симплектическую структуру, калибровочную симметрию и общую плотность энергии-импульса. Было проведено два численных эксперимента. Численные результаты воспроизводят характерные диспер-

сионные соотношения объемных плазмонов и поверхностных плазмон-поляритонов, а численные ошибки сохраняющихся величин во всех экспериментах ограничены небольшой величиной после длительного моделирования.

В статье [44] аналитически получены дисперсионные соотношения для поперечно-электрических (ТЕ) и поперечно-магнитных (ТМ) поверхностных плазмон-поляритонов в нелинейном двумерном проводящем материале с инверсионной симметрией, лежащим между двумя диэлектрическими средами керровского типа. Для этого воспользуемся уравнениями Максвелла в квазиэлектростатическом слабодиссипативном режиме. Показано, что длина волны и расстояние распространения поверхностных плазмонов уменьшаются из-за нелинейности окружающего диэлектрика. Напротив, эффект нелинейности двумерного материала зависит от знаков действительной и мнимой частей проводимости третьего порядка. Примечательно, что дисперсионные соотношения, полученные путём наивной замены диэлектрической проницаемости диэлектрической среды её нелинейным аналогом в соответствующих дисперсионных соотношениях линейного режима, не точны. Применяем анализ к случаю легированного графена и делаем прогнозы для длины волны поверхностного плазмона и расстояния распространения.

Гиперболические метаповерхности привлекли значительное внимание из-за необычных электромагнитных свойств для управления распространяющимися плоскими волнами, но возбуждение и распространение поверхностных плазмон-поляритонов на гиперболических метаповерхностях, называемых гиперболическими плазмонами, экспериментально наблюдались только недавно. Однако преимущества гиперболических плазмонов, такие как гибридная поляризация ТЕ-ТМ ещё не полностью раскрыты и проанализированы. В статье [45] сосредоточиваются на численном и экспериментальном описании поверхностных волн в диапазоне частот от 2 до 8 ГГц, поддерживаемых гиперболической метаповерхностью, состоящей из анизотропных металлических иерусалимских крестов, напечатанных на тонкой диэлектрической подложке. Показаны различные формы контуров равной частоты, которые соответствуют множеству режимов возбуждения и распространения поверхностных волн. Принципиальная новизна данной работы состоит в экспериментальной демонстрации поверхностных волн с гибридной, то есть смешанной ТЕ-ТМ поляризацией. Поверхностные волны с гибридной поляризацией являются многообещающим инструментом для ряда приложений и явлений, включая преобразователи поляризации, плазмонные датчики, управление плазмонами по поверхности, оптические силы и спин-орбитальную фотонику, и они подчеркивают влияние встроенных в кристалл и планарных сети.

Здесь представлен обзор текущих исследований поверхностных плазмон-поляритонов, включая фундаментальную физику и приложения. Обзор литературы показывает актуальность исследований в области наноплазмоники.

Теоретическая модель

Рассмотрим объёмные и поверхностные плазмон-поляритоны в трёхмерных металлах. Плазма — это среда с равной концентрацией положительных и отрицательных зарядов, из которых хотя бы один тип заряда является подвижным. В классическом подходе считается, что металлы образуют плазму, состоящую из ионов и электронов. Последние представляют собой только валентные электроны, которые не взаимодействуют друг с другом, образуя идеальный отрицательно заряженный свободный электронный газ. Положительные ионы, то есть ядра атомов, равномерно распределены, образуя постоянный фон положительного заряда. Считается, что фоновый положительный заряд зафиксирован в пространстве и, как результат, он не реагирует на какие-либо электронные колебания или какое-либо внешнее поле, в то время как электронный газ может свободно перемещаться. В равновесии плотность электронов (море плазмы) также рав-

номерно распределена в любой точке, сохраняя общую электрическую нейтральность системы. Металлы поддерживают свободные и коллективные продольные колебания заряда с чётко определённой собственной частотой, называемой плазменной частотой ω_p. Квантами этих зарядовых колебаний являются плазмоны, то есть квазичастицы с энергией $E_p = \hbar\omega_p$, где $\hbar$ – постоянная Планка.

Понимание и моделирование явления поверхностного плазмона на границах раздела металлов с потерями на основе упрощённых моделей диэлектрической функции приводит к проблемам при столкновении с реальностью. Для реалистичного описания металлов с потерями, таких как золото и серебро, в оптическом диапазоне электромагнитного спектра и в соседних спектральных диапазонах необходимо учитывать не только омические потери, но и радиационные потери, возникающие из-за частотно-зависимых межзонные переходы. Рассмотрим подробный анализ теоретических моделей распространения поверхностных плазмон-поляритонов и локализованных поверхностных плазмонов, поддерживаемых такими реалистичными границами раздела металла и диэлектрика, на основе дисперсионных соотношений как для плоских, так и для сферических границ раздела золота и серебра в расширенном диапазоне частот и размеров наночастиц. Исследование выявляет область аномальной дисперсии для плоской границы раздела серебра в ближнем ультрафиолетовом спектральном диапазоне и факторы высокого качества для более крупных наночастиц.

При наличии границы раздела сред возникает новый управляемый режим коллективных колебаний, называемый поверхностным плазмоном. Поверхностный плазмон — это поверхностная электромагнитная волна, которая распространяется вдоль границы раздела между проводником (металлом) и изолятором (диэлектриком). Эта управляемая мода взаимодействует с электромагнитными волнами, в результате чего возникает поляритон. Поверхностные плазмон-поляритоны возникают на частотах, близких, но меньших, чем частота плазмы. Эти поверхностные моды демонстрируют исключительные свойства для приложений нанофотоники, в частности, они сами составляют класс нанофотоники, а именно наноплазмоники. Основное свойство – субволновая природа, то есть длина волны поверхностных плазмон-поляритонов меньше, чем у электромагнитного излучения той же частоты и в той же среде.

Рассмотрим волновод, образованный плоской границей раздела при $z = 0$, состоящий из двух полубесконечных немагнитных сред (проницаемость $\mu = 1$) с диэлектрическими функциями ε_1 и ε_2. Предполагается, что диэлектрические функции локальны в пространстве (не зависят от $q-$) и нелокальны во времени (ω – зависимость), следовательно, $\varepsilon_{1,2} = \varepsilon_{1,2}(\omega)$. Предполагая гармоническую зависимость от времени в виде $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{u}(\mathbf{r})\, e^{-\mathrm{i}\omega t}$ уравнения Максвелла (в единицах СГС) в отсутствие внешних зарядов и токов читаются следующим образом:

$$\nabla \cdot (\varepsilon_j \mathbf{E}_j) = 0 \qquad \nabla \times \mathbf{E}_j = \mathrm{i}k_0 \mathbf{H}_j \tag{1}$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{H}_j) = 0 \qquad \nabla \times \mathbf{H}_j = -\mathrm{i}\varepsilon_j k_0 \mathbf{E}_j \ , \tag{2}$$

где $k_0 = \omega/c$ – волновое число свободного пространства, а индекс j обозначает среду как: $j = 1$ для $z < 0$ и $j = 2$ для $z > 0$. Комбинируя уравнения (1) - (2), поля разделяются на два отдельных уравнения Гельмгольца как

$$\left[\nabla^2 + k_0^2 \varepsilon_j\right] \begin{pmatrix} \mathbf{E}_j(\mathbf{r}) \\ \mathbf{H}_j(\mathbf{r}) \end{pmatrix} = 0 \ , \tag{3}$$

где $\mathbf{r} = (x, y, z)$. Для простоты предположим, что поверхностные электромагнитные волны распространяются в одном направлении, выбранном в качестве направления x, и не демонстрируют пространственных изменений в перпендикулярном направлении в

плоскости, следовательно, $\partial_y \mathbf{u} = 0$. В этом предположении мы ищем электромагнитные волны вида $\mathbf{\Psi}_j(\mathbf{r}) = \mathbf{\Psi}_j(z)\, e^{\mathrm{i}q_j x}$, где $\mathbf{\Psi}_j = (\mathbf{E}_j, \mathbf{H}_j)^T$ и q будет постоянной распространения плазмона. Подставляя вышеупомянутый анзац в уравнение Гельмгольца (3), мы получаем уравнение управляемых электромагнитных мод

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \left(k_0^2 \varepsilon_j - q_j^2\right)\right] \begin{pmatrix} \mathbf{E}_j(z) \\ \mathbf{H}_j(z) \end{pmatrix} = 0 \,. \tag{4}$$

Поверхностные волны — это волны, захваченные на границе раздела ($z = 0$) и экспоненциально затухающие при удалении от него $\left(\mathbf{\Psi}(z) \sim e^{-\kappa_j |z|} \mathrm{for} k_j > 0\right)$. Следовательно, распространяющиеся волновые решения вдоль z нежелательны. В свою очередь, приходим условию поверхностной волны

$$\kappa_j = \sqrt{q_j^2 - k_0^2 \varepsilon_j} \in \mathbb{R} \,. \tag{5}$$

Чтобы определить пространственные профили поля и соотношение дисперсии поверхностных плазмон-поляритонов, нам необходимо найти явные выражения для каждой компоненты поля $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$. Это может быть достигнуто путём решения уравнений локона (1) и (2), которые естественным образом приводят к двум самосогласованным системам связанных управляющих уравнений. Каждый набор соответствует одной из основных поляризаций, а именно поперечной магнитной (p-поляризованные волны) и поперечной электрической (s-поляризованные волны).

Для поперечных магнитных (p-поляризованных) волн

$$E_{jz} = -\frac{q_j}{k_0 \varepsilon_j} H_{jy} \,, \tag{6}$$

$$E_{jx} = -\frac{\mathrm{i}}{k_0 \varepsilon_j} \frac{\partial}{\partial z} H_{jy} \,, \tag{7}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} H_{jy} - \left(q_j^2 - k_0^2 \varepsilon_j\right) H_{jy} = 0 \,. \tag{8}$$

Для поперечных электрических (s-поляризованных волн)

$$H_{jz} = \frac{q}{k_0} E_{jy} \,, \tag{9}$$

$$H_{jx} = \frac{\mathrm{i}}{k_0} \frac{\partial}{\partial z} E_{jy} \,, \tag{10}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} E_{jy} - \left(q_j^2 - k_0^2 \varepsilon_j\right) E_{jy} = 0 \,. \tag{11}$$

Мы фокусируемся на поперечной магнитной (TM) поляризации, в которой магнитное поле $\mathbf{H}$ параллельно границе раздела. Поскольку плоский интерфейс простирается вдоль плоскости (x, y), TM-поля читаются как $\mathbf{E}_j = (E_{jx}, 0, E_{jz})$ и $\mathbf{H}_j = (0, H_{jy}, 0)$. Решая уравнения TM для поверхностных волн, получаем для полуплоскости $z < 0 \quad (j = 1)$

$$H_y = \; A_1 e^{\mathrm{i}q_1 x} e^{k_1 z} \,, \tag{12}$$

$$E_x = -\frac{\mathrm{i}k_1 A_1}{k_0 \varepsilon_1} e^{\mathrm{i}q_1 x} e^{k_1 z} \,, \tag{13}$$

$$E_z = -\frac{q_1 A_1}{k_0 \varepsilon_1} e^{\mathrm{i}q_1 x} e^{k_1 z} \,, \tag{14}$$

для полуплоскости $z > 0 \quad (j = 2)$

$$H_y = A_2 e^{\mathrm{i}q_2 x} e^{-k_2 z} , \tag{15}$$

$$E_x = \frac{\mathrm{i}k_2 A_2}{k_0 \varepsilon_2} e^{\mathrm{i}q_2 x} e^{-k_2 z} , \tag{16}$$

$$E_z = -\frac{q_2 A_2}{k_0 \varepsilon_2} e^{\mathrm{i}q_2 x} e^{-k_2 z} , \tag{17}$$

где k_j связано с q_j уравнением (5). Граничные условия подразумевают, что параллельные интерфейсным компонентам электрические (E_x) и магнитные (H_y) поля должны быть непрерывными. Соответственно, мы требуем (12)=(15) и (13)=(16) при $z = 0$, следовательно, мы найти систему уравнений (13)=(16) в $z = 0$, отсюда находим систему уравнений

$$\begin{pmatrix} e^{\mathrm{i}q_1 x} & -e^{\mathrm{i}q_2 x} \\ \frac{k_1}{\varepsilon_1} e^{\mathrm{i}q_1 x} & \frac{k_2}{\varepsilon_2} e^{\mathrm{i}q_2 x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = 0 , \tag{18}$$

которое имеет решение, только если определитель равен нулю. В результате мы получаем так называемое условие поверхностного плазмон-поляритона

$$\frac{k_1}{\varepsilon_1} + \frac{k_2}{\varepsilon_2} = 0 . \tag{19}$$

Условие (19) гласит, что граница раздела должна состоять из материалов с противоположными знаковыми диэлектрическими проницаемостями, поскольку условие поверхностной волны требует, чтобы действительная часть как k_1, так и k_2 была неотрицательными числами. По этой причине граница раздела между металлами и диэлектриками может поддерживать поверхностные плазмоны, поскольку металлы показывают отрицательную диэлектрическую проницаемость на частотах, меньших, чем плазменная частота. Кроме того, граничные условия требуют непрерывности нормального к границе раздела электрического смещения ($D_{jz} = \varepsilon_j E_{jz}$), что даёт непрерывность постоянной распространения плазмона $q_1 = q_2 = q$. В свою очередь, комбинируя уравнения (5) с (19), мы получаем дисперсионное соотношение для поверхностного плазмон-поляритона

$$q(\omega) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} , \tag{20}$$

где $\varepsilon_{1,2}$, вообще говоря, комплексные функции от ω. Для границы раздела металл-диэлектрик удобнее использовать обозначения $\varepsilon_1 = \varepsilon_d$ и $\varepsilon_2 = \varepsilon_m$ для диэлектрической проницаемости и диэлектрической проницаемости металла соответственно. В длинноволновой области волновое число поверхностных плазмон-поляритонов близко к световой линии в диэлектрике, то есть $q \simeq k_0 \sqrt{\varepsilon_d}$, и волны распространяются на многие длины волн в диэлектрики; эти волны известны как волны Зоммерфельда-Ценнека и имеют сходство с электромагнитными модами на свободной поверхности. С другой стороны, в пределе $q \to \infty$ уравнение (20) асимптотически приводит к условию

$$\varepsilon_d + \varepsilon_m = 0 \tag{21}$$

с указанием предела незадержанного поверхностного плазмона. Вблизи предела без задержки уравнение (5) даёт $k_j \simeq q \gg k_0$. Кроме того, в неотложном пределе фазовая скорость $v_{ph} = \omega/q$ стремится к нулю, обнаруживая электростатическую природу, характеризующую поверхностный плазмон. В результате на той же частоте v_{ph} намного меньше скорости света и, следовательно, длина волны поверхностного плазмон-поляритона (λ_{sp}) всегда меньше длины волны света (λ_{ph}), то есть $\lambda_{sp} < \lambda_{ph}$, раскрывая

субволновую природу поверхностных плазмон-поляритонов. Кроме того, из-за того, что фазовая скорость поверхностного плазмон-поляритона всегда меньше фазовой скорости распространяющихся электромагнитных волн, поверхностные плазмон-поляритоны не могут излучать и, следовательно, они являются чётко определёнными поверхностными распространяющимися электромагнитными волнами. Требование $q \to \infty$ в диэлектрической функции, мы находим так называемую частоту поверхностного плазмона ω_{sp}, которая является верхней границей частоты, с которой встречаются поверхностные плазмон-поляритоны

$$\omega_{sp} = \sqrt{\frac{\omega_p^2}{1+\varepsilon_d} - \gamma^2} \simeq \frac{\omega_p}{\sqrt{1+\varepsilon_d}}\,, \tag{22}$$

что указывает на то, что поверхностные плазмон-поляритоны всегда встречаются на частотах меньших, чем объёмные плазмоны.

Если мы будем следовать той же процедуре для поперечных электрических поляризованных полей, в которых электрическое поле параллельно границе раздела, а единственными ненулевыми компонентами электромагнитного поля являются E_y, H_x, и H_z, мы найдём условие $k_1 + k_2 = 0$. Это условие выполняется только при $k_1 = k_2 = 0$ при обнаружении отсутствия s-поляризованных поверхностных мод. Следовательно, поверхностные плазмон-поляритоны всегда являются электромагнитными ТМ-волнами.

Из-за металлических потерь поверхностных плазмон-поляритонов экспоненциально затухают вдоль границы раздела, ограничивая длину распространения. С математической точки зрения потери описываются малой мнимой частью комплексной диэлектрической функции металла $\varepsilon_m = -\varepsilon_m' - \mathrm{i}\varepsilon_m''$, где $\varepsilon_m', \varepsilon_m'' > 0$. Следовательно, постоянная распространения плазмонных волн (20) становится сложной, то есть $q = q' + \mathrm{i}q''$, где мнимая часть учитывает потери энергии поверхностных плазмон-поляритонов. В свою очередь, эффективная длина распространения L, которая показывает скорость изменения ослабления энергии поверхностных плазмон-поляритонов, определяется мнимой частью q как $L^{-1} = 2q$.

Для уменьшения потерь при распространении поверхностных плазмон-поляритонов использовались материалы усиления, а не пассивные обычные диэлектрики. Материалы усиления характеризуются сложной функцией диэлектрической проницаемости, то есть $\varepsilon_d = \varepsilon_d' + \mathrm{i}\varepsilon_d''$, с $\varepsilon_d', \varepsilon_d'' > 0$, где ε_d'' – небольшое число по сравнению с ε_d' и учитывает выигрыш. В результате усиленный диэлектрик передает энергию системе, уравновешивая потери металла. Мы исследуем соотношение дисперсии поверхностных плазмон-поляритонов (20) в присутствии материалов с усилением и потерями и находим явную формулу для усиления ε_d'', в которой волновое число поверхностных плазмон-поляритонов приводится к действительной функции, в результате чего к распространению поверхностных плазмон-поляритонов без потерь. Кроме того, мы находим верхний предел допустимых значений усиления. В этом критическом усилении чисто реальная постоянная распространения поверхностных плазмон-поляритонов становится чисто мнимой, разрушая моды поверхностных плазмон-поляритонов.

Дисперсионное соотношение (20) также можно записать как $q = k_0 n_{sp}$, где n_{sp} – эффективный показатель преломления плазмона, определяемый формулой

$$n_{sp} = \sqrt{\frac{\varepsilon_d \varepsilon_m}{\varepsilon_d + \varepsilon_m}}\,. \tag{23}$$

Мы ищем такое значение ε_d'', чтобы эффективный показатель преломления n_{sp} стал действительным. Подставляя комплексную функцию, описывающую диэлектрик и металл,

в уравнение (23), функция n_{sp} записывается в обычной комплексной форме как

$$n_{sp} = \sqrt{\frac{\sqrt{x^2+y^2}+x}{2}} + \mathrm{i}\,\mathrm{sgn}\,(y)\sqrt{\frac{\sqrt{x^2+y^2}-x}{2}}\,, \tag{24}$$

где $\mathrm{sgn}\,(y)$ – прерывная сигнум-функция и

$$x = \frac{\varepsilon'_d|\varepsilon_m|^2 - \varepsilon'_m|\varepsilon_d|^2}{|\varepsilon_d+\varepsilon_m|^2}\,, \tag{25}$$

$$y = \frac{\varepsilon''_d|\varepsilon_m|^2 - \varepsilon''_m|\varepsilon_d|^2}{|\varepsilon_d+\varepsilon_m|^2}\,, \tag{26}$$

где $|z_*|$ обозначает норму комплексного числа z_*. Полюса в уравнениях (25) и (26) соответствуют пределу невозвратного поверхностного плазмона (21).

Рассматривая эффективный индекс плазмона n_{sp} в уравнении (24) в плоскости $(x,\, y)$, мы видим, что распространение поверхностных плазмон-поляритонов без потерь ($n_{sp} = q = 0$), гарантируется, когда одновременно выполняются условия $y = 0$ и $x > 0$. Отметим, что при $y = 0$ и $x < 0$, хотя мнимая часть в уравнении (24) обращается в нуль из-за сигнум-функции, его действительная часть становится мнимой, то есть $n_{sp} = \mathrm{i}\sqrt{|x|}$, что не соответствует волнам распространения. Решение уравнения (26) для $y = 0$ относительно прироста ε''_d и обход ограничения без задержки (21), то есть $\varepsilon_d \neq -\varepsilon_m$, получаем два точных решения следующим образом

$$\varepsilon''_{d\pm} = \frac{|\varepsilon_m|^2}{2\varepsilon''_m}\left(1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{2\varepsilon'_d\varepsilon''_m}{|\varepsilon_m|^2}\right)^2}\right)\,. \tag{27}$$

Поскольку ε_d реально, мы читаем из уравнения (27), что

$$|\varepsilon_m|^2 \geqslant 2\varepsilon'_d\varepsilon''_m\,. \tag{28}$$

Используя неравенство (28), мы читаем для решения ε_{d+} (27), что $\varepsilon''_{d+} \geqslant \varepsilon'_d$. Это противоречие, поскольку ε''_d определено как меньшее, чем ε'_d. Таким образом, ε_{d+} не соответствует физически значимому усилению.

С другой стороны, решая уравнение (25) для $x > 0$ относительно диэлектрического коэффициента усиления ε''_d, мы определяем критическое значение ε_c, различающие режимы распространения без потерь и запрещенного распространения поверхностных плазмон-поляритонов, а именно

$$\varepsilon_c = \varepsilon'_d\sqrt{\frac{|\varepsilon_m|^2}{\varepsilon'_m\varepsilon'_d} - 1}\,, \tag{29}$$

следовательно, уравнение (29) устанавливает верхний предел значений усиления. Появление критического усиления можно понять следующим образом: В уравнении (27) усиление ε_{d-} становится равным критическому усилению ε_c, когда $\varepsilon_d + \varepsilon_m = 0$, где последний элемент — это незадействованный предел, где $q \to \infty$. В частности, поверхностный плазмон существует, когда металл характеризуется диэлектрической функцией Друде, $\varepsilon''_{d-} = \varepsilon_c$ при $\omega = \omega_{sp}$, соответствующей максимальной частоте.

Чтобы представить вышеупомянутые теоретические результаты, мы используем диэлектрическую функцию для расчета уравнения дисперсии поверхностных плазмон-поляритонов для границы раздела, состоящей из серебра с $\omega_p\,(0) = 13.67\,\text{ПГц}$ и $\gamma =$

0.1018 ПГц, и кварцевое стекло с $\varepsilon_d' = 1.69$ и усиление $\varepsilon_d'' = \varepsilon_{d-}$, определяемое уравнением (27). Мы представляем дисперсионное соотношение поверхностных плазмон-поляритонов уравнением (20) для случая без потерь ($\varepsilon_d'' = \varepsilon_{d-}''$). Указывается действительная и мнимая нормализованная дисперсия поверхностных плазмон-поляритонов q/k_p ($k_p \equiv \omega_p/c$) относительно нормированной частоты ω/ω_p. Действительно, мы замечаем, что для $\omega < \omega_{sp}$ мнимая часть q обращается в нуль, тогда как для $\omega > \omega_{sp}$ волновое число поверхностных плазмон-поляритонов чисто мнимое. В дальнейшем в окрестности $\omega = \omega_{sp}$ ожидается фазовый переход от распространения поверхностных плазмон-поляритонов к запрещённому распространению поверхностных плазмон-поляритонов без потерь.

Рассмотрим эффективную диэлектрическую проницаемость нанокомпозита в приближении эффективной среды. В дальнейшем рассмотрении будем пользоваться приближением эффективной среды для нанокомпозитного материала сред. Эффективная диэлектрическая проницаемость нанокомпозитной среды может быть найдена из формулы

$$\frac{\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon_m}{g\left(\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon_m\right) + \varepsilon_m} = f\frac{\varepsilon_p - \varepsilon_m}{g\left(\varepsilon_p - \varepsilon_m\right) + \varepsilon_m}\ , \tag{30}$$

где f – фактор заполнения металлическими наночастицами нанокомпозитной среды, g – фактор деполяризации, определяемый формой и ориентацией частицы. Для наночастиц сферической формы деполяризующий фактор принимает значение $g = 1/3$. Выразим эффективную диэлектрическую проницаемость нанокомпозитной среды в явном виде. Тогда получим следующее выражение

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_m\left(1 + \frac{f\left(\varepsilon_p - \varepsilon_m\right)}{\varepsilon_m + (1-f)\,g\left(\varepsilon_p - \varepsilon_m\right)}\right)\ , \tag{31}$$

которое будет пригодно для проведения численных расчётов без численного решения уравнения (30) для нахождения эффективной поляризуемости металл-диэлектрической композитной среды.

Учёт релаксации и влияния размера наноразмерных включений в выражении для $\varepsilon_p(\omega)$ приводит к комплексности выражения эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозитной среды

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_{\text{eff}}' + i\varepsilon_{\text{eff}}''\ , \tag{32}$$

где действительная часть эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозитной среды

$$\varepsilon_{\text{eff}}' = \varepsilon_d + \frac{f}{G}\left\{\left(\varepsilon_p' - \varepsilon_d\right)\left(1 + g\,(1-f)\,\frac{\varepsilon_p' - \varepsilon_d}{\varepsilon_d}\right) + g\,(1-f)\,\frac{\left(\varepsilon_p''\right)^2}{\varepsilon_d}\right\}$$

и мнимая часть эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозитной среды

$$\varepsilon_{\text{eff}}'' = \frac{f\,\varepsilon_p''}{G}\ .$$

Кроме того, введены следующие обозначения:

$$G = \left(1 + g\,(1-f)\,\frac{\varepsilon_p' - \varepsilon_d}{\varepsilon_d}\right)^2 + \left(g\,(1-f)\,\frac{\varepsilon_p''}{\varepsilon_d}\right)^2\ ,$$

$$\varepsilon_p' = \varepsilon_0 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}\ ,$$

$$\varepsilon_p'' = \frac{\gamma\,\omega_p^2}{\omega\,(\omega^2+\gamma^2)}\ .$$

Для случаев наночастиц в форме эллипсоидов деполяризующий фактор имеет вид при $\xi < 1$

$$g_z = \frac{1}{1-\xi^2}\left(1 - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\arcsin\sqrt{1-\xi^2}\right)\ , \tag{33}$$

а при $\xi > 1$

$$g_z = \frac{1}{\xi^2-1}\left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\ln\left(\xi+\sqrt{1-\xi^2}\right) - 1\right)\ , \tag{34}$$

где введён коэффициент эллиптичности наночастиц $\xi = b/a$, где a и b – полуоси наночастицы.

Оставшиеся компоненты деполяризующего фактора наночастиц находятся по формуле

$$g_{x,y} = \frac{1}{2}\,(1-g_z)\ . \tag{35}$$

Результаты компьютерного моделирования распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита

Поверхностные плазмон-поляритоны могут возбуждаться на границе раздела с плоской металлической поверхностью, когда действительная часть металлической диэлектрической проницаемости, $\varepsilon_m = \varepsilon_m' + i\varepsilon_m''$ отрицательна, $\varepsilon_m' < 0$, а потери относительно маленькие, $k = \varepsilon_{m/}'' \left|\varepsilon_m'\right| \ll 1$, что типично для металлов в оптическом диапазону. Во-первых, для простоты положим $k = 0$ и обозначим отрицательную диэлектрическую проницаемость ε_m как $-n^2$, где n – величина показателя преломления. На границе раздела металла с диэлектриком поверхностный плазмон-поляритон представляет собой ТМ-волну, с направлением магнитного поля $\mathbf{H}$, параллельного металлической поверхности 1. В направлении, перпендикулярном к границе раздела, поверхностные плазмон-поляритоны экспоненциально затухают в обеих средах. Связь между частотой ν и волновым вектором k_p поверхностного плазмон–поляритона могут быть из следующего соображения. Установим металл-диэлектрическую поверхность как плоскость xy, и предположим, что поверхностный плазмон-поляритон распространяется в направлении x, причём поле $\mathbf{H}$, направленно в $\mathbf{H} = \{0, H, 0\}$. Для простоты также предположим, что полупространство $z < 0$ – вакуум, диэлектрическая постоянная $\varepsilon = 0$ и пренебрегаем, потерей для металла в $z > 0$ полупространстве.

Как известно, при анизотропии частиц нанокомпозит приобретает свойства одноосного кристалла. Будем рассматривать собственные волны ТМ-типа. Связь поперечной компоненты волнового вектора с константой распространения в диэлектрике не отличается от q_d^2. В нанокомпозите всё обстоит немного сложнее. Пусть главная оптическая ось параллельна оси Ox, тогда связь поперечной компоненты волнового вектора с константой распространения выглядит следующим образом

$$q_n^2 = \beta^2\frac{\varepsilon_\parallel}{\varepsilon_\perp} - k_0^2\varepsilon_\parallel\mu_n\ , \tag{36}$$

Пользуясь дисперсионным соотношением, получим

$$\frac{q_n}{\varepsilon_\parallel} + \frac{q_d}{\varepsilon_d} = 0\ , \tag{37}$$

и указанными выше уравнениями, можно получить явный вид частотной зависимости константы распространения

$$\beta^2 = k_0^2 \frac{\varepsilon_{\parallel}\varepsilon_d\left(\varepsilon_d\mu_n - \varepsilon_{\perp}\mu_d\right)}{\varepsilon_d^2 - \varepsilon_{\perp}\varepsilon_{\parallel}} \,. \tag{38}$$

Выражения для компонент вектора Умова–Пойнтинга для потока энергии сквозь границу раздела диэлектрической и нанокомпозитной сред в случае его направленности к этой границе раздела имеют вид

$$S_x^d = \frac{|H_0|^2}{4}\frac{\beta'}{k_0\varepsilon_d} = \frac{k_0\varepsilon_d\,|E_0|^2}{4}\frac{\beta'}{|\beta|^2} \,, \tag{39}$$

$$S_x^n = \frac{|H_0|^2}{4k_0}\frac{\beta'\varepsilon'_{\text{eff}\perp} - \beta''\varepsilon''_{\text{eff}\perp}}{|\varepsilon_{\text{eff}\perp}|^2} = \frac{k_0\,|E_0|^2}{4}\frac{\beta'\varepsilon'_{\text{eff}\perp} + \beta''\varepsilon''_{\text{eff}\perp}}{|\beta|^2} \,, \tag{40}$$

$$S_z^d = \frac{|H_0|^2}{4}\frac{q''_d}{k_0\varepsilon_d} \,, \tag{41}$$

$$S_z^n = \frac{|H_0|^2}{4k_0}\frac{q'_n\varepsilon''_{\text{eff}||} - q''_n\varepsilon'_{\text{eff}||}}{\left|\varepsilon_{\text{eff}||}\right|^2} \,. \tag{42}$$

Приведём результаты численных расчётов оптических характеристик поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита. В работе рассматривается результаты численных расчётов оптических характеристик поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита. Основной расчетный блок разрабатываемой компьютерной программы начинается с описания функций, характеризующих дисперсионных зависимостей диэлектрической проницаемости диэлектрических сред и нанокомпозитной среды, эффективного комплексного показателя преломления для диэлектрических сред и нанокомпозитной среды. Ключевую часть программы составляют формулы смешения Максвелл-Гарнетта, позволяющие рассчитывать эффективные параметры нанокомпозитных сред с металлическими наночастицами. В ходе работы будут подвергнуты анализу и запрограммированы функциональные зависимости эффективных параметров таких, как эффективная диэлектрическая проницаемость и эффективный показатель преломления нанокомпозитных сред с металлическими наночастицами. На основании проведённых расчётов набора характеристик распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита получить зависимости константы распространения и потоков энергии электромагнитной волны поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита как функции длины волны оптического излучения.

Заключительная часть компьютерной программы формирует графики константы распространения и потоков энергии электромагнитной волны поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита как функции длины волны оптического излучения.

Построенные графические зависимости будут способствовать исследованию новых наноплазмонных материалов на основе чередующихся слоёв из диэлектрических и нанокомпозитных сред с металлическими наночастицами.

На рис. 1 изображена часть программы на языке программирования Python для расчёта оптических характеристик поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита с металлическими наночастицами.

Рассмотрим результаты численных расчётов оптических характеристик поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита.

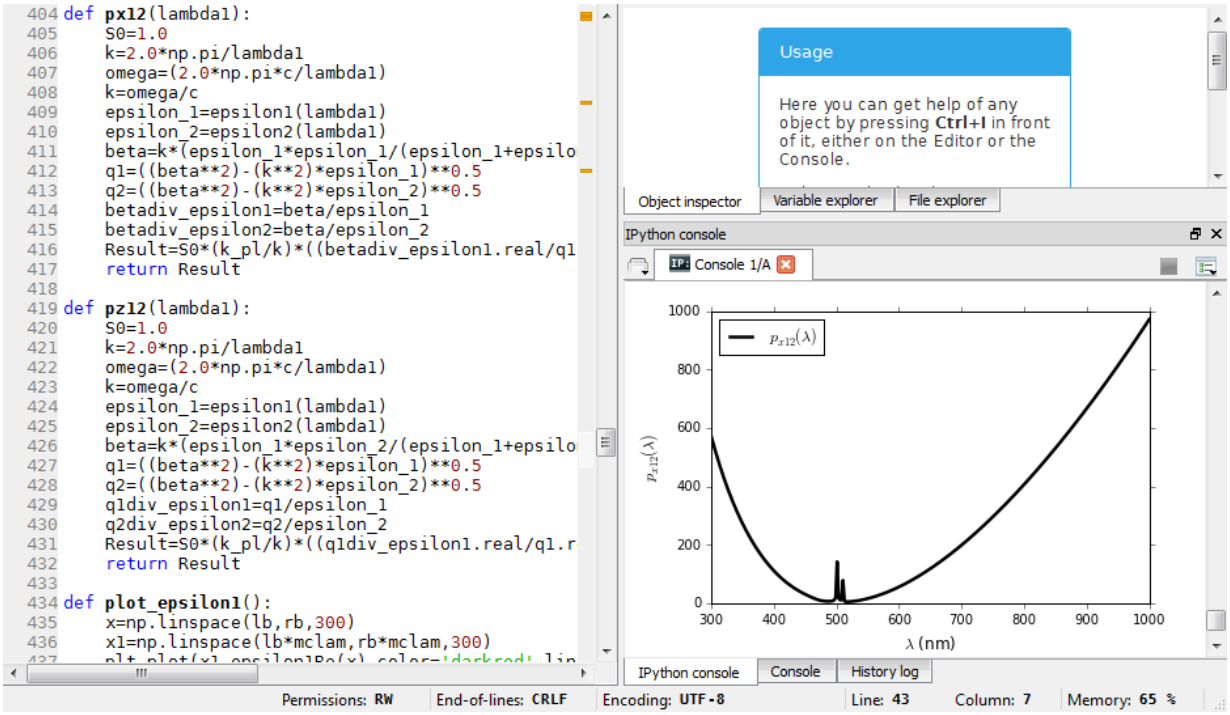


Рис. 1. Часть программы на языке программирования Python для расчёта оптических характеристик поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита с металлическими наночастицами.

На рис. 2 изображена зависимость эффективной диэлектрической проницаемости наноструктуры из первой нанокомпозитной среды с матрицей из полиметилметакрилата и наноразмерными включениями в виде наночастиц золота с фактором заполнения $f_1 = 2\,\%$, радиусом наночастиц $a_1 = 2.5\,\text{нм}$, и второй среды из стекла ВК5. а) $\text{Re}\{\varepsilon_1(\lambda)\}$, б) $\text{Im}\{\varepsilon_1(\lambda)\}$, в) $\text{Re}\{\varepsilon_2(\lambda)\}$, г) $\text{Im}\{\varepsilon_2(\lambda)\}$. Металлические наночастицы имеют сферическую форму.

На рис. 3 изображена зависимость действительной и мнимой частей комплексной константы распространения поверхностного плазмон-поляритона в наноструктуре из первой нанокомпозитной среды с матрицей из полиметилметакрилата и наноразмерными включениями в виде наночастиц золота с фактором заполнения $f_1 = 2\,\%$, радиусом наночастиц $a_1 = 2.5\,\text{нм}$, и второй среды из стекла ВК5. а) $\text{Re}\{\beta_1(\lambda)\}/k_{\text{pl}}$, б) $\text{Im}\{\beta_1(\lambda)\}/k_{\text{pl}}$, в) $\text{Re}\{\beta_2(\lambda)\}/k_{\text{pl}}$, г) $\text{Im}\{\beta_2(\lambda)\}/k_{\text{pl}}$.

На рис. 4 изображена зависимость усреднённого потока энергии электромагнитной волны поверхностного плазмон-поляритона в наноструктуре из первой нанокомпозитной среды с матрицей из полиметилметакрилата и наноразмерными включениями в виде наночастиц золота с фактором заполнения $f_1 = 2\,\%$, радиусом наночастиц $a_1 = 2.5\,\text{нм}$, и второй среды из стекла ВК5. Буквами обозначены: а) $p_{x01}(\lambda)/p_0$, б) $p_{z01}(\lambda)/p_0$, в) $p_{x12}(\lambda)/p_0$, г) $p_{z12}(\lambda)/p_0$.

На рис. 5 изображена зависимость эффективной диэлектрической проницаемости наноструктуры из первой нанокомпозитной среды с матрицей из полиметилметакрилата и наноразмерными включениями в виде наночастиц золота с фактором заполнения $f_1 = 15\,\%$, радиусом наночастиц $a_1 = 12.5\,\text{нм}$, и второй среды из стекла ВК5. а) $\text{Re}\{\varepsilon_1(\lambda)\}$, б) $\text{Im}\{\varepsilon_1(\lambda)\}$, в) $\text{Re}\{\varepsilon_2(\lambda)\}$, г) $\text{Im}\{\varepsilon_2(\lambda)\}$. Металлические наночастицы имеют сферическую форму.

На рис. 6 изображена зависимость действительной и мнимой частей комплексной константы распространения поверхностного плазмон-поляритона в наноструктуре из первой нанокомпозитной среды с матрицей из полиметилметакрилата и наноразмер-

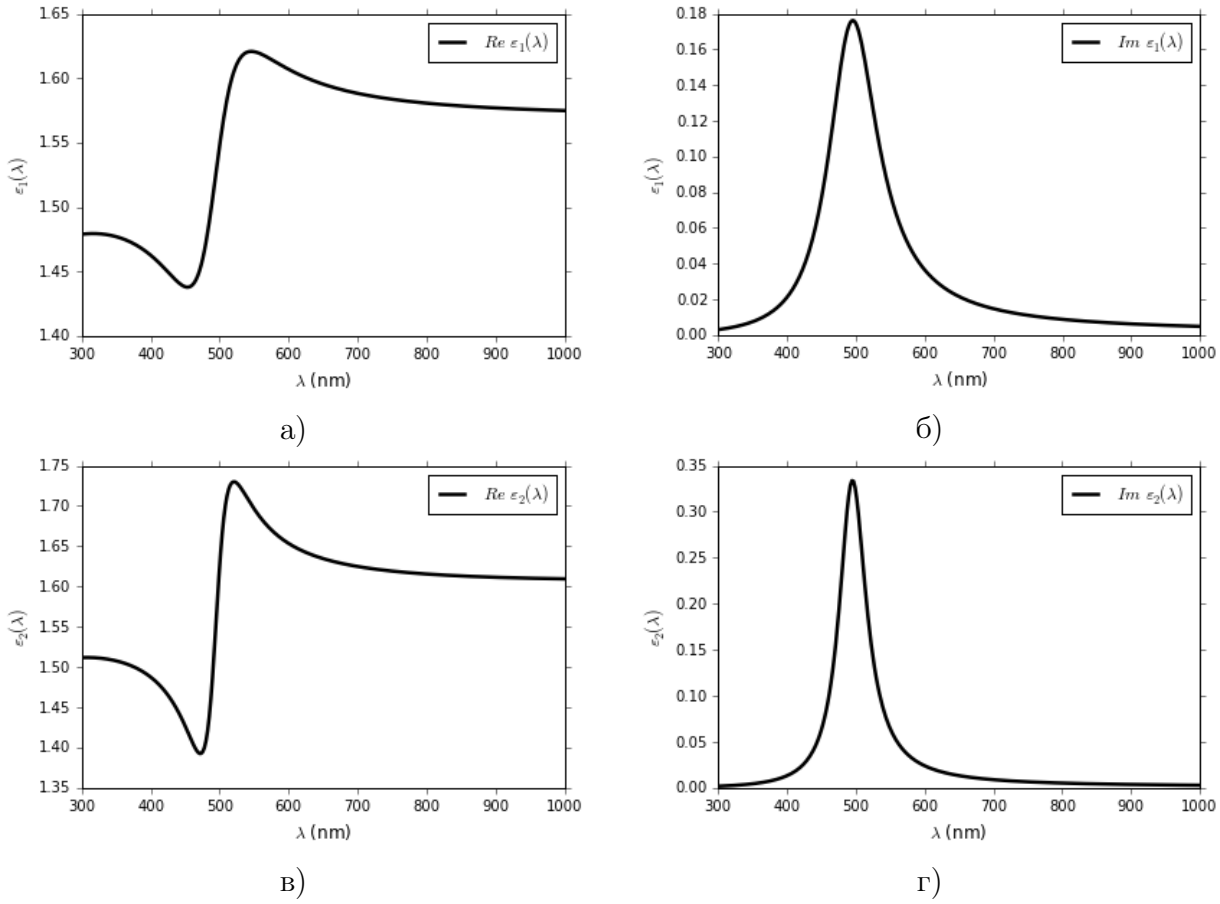


Рис. 2. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости наноструктуры из первой нанокомпозитной среды с матрицей из полиметилметакрилата и наноразмерными включениями в виде наночастиц золота с фактором заполнения $f_1 = 2\,\%$, радиусом наночастиц $a_1 = 2.5\,$нм, и второй среды из стекла ВК5. Буквами обозначены: а) $\mathrm{Re}\{\varepsilon_1(\lambda)\}$, б) $\mathrm{Im}\{\varepsilon_1(\lambda)\}$, в) $\mathrm{Re}\{\varepsilon_2(\lambda)\}$, г) $\mathrm{Im}\{\varepsilon_2(\lambda)\}$.

ными включениями в виде наночастиц золота с фактором заполнения $f_1 = 15\,\%$, радиусом наночастиц $a_1 = 12.5\,$нм, и второй среды из стекла ВК5. а) $\mathrm{Re}\{\beta_1(\lambda)\}/k_{\mathrm{pl}}$, б) $\mathrm{Im}\{\beta_1(\lambda)\}/k_{\mathrm{pl}}$, в) $\mathrm{Re}\{\beta_2(\lambda)\}/k_{\mathrm{pl}}$, г) $\mathrm{Im}\{\beta_2(\lambda)\}/k_{\mathrm{pl}}$.

На рис. 7 изображена зависимость усреднённого потока энергии электромагнитной волны поверхностного плазмон-поляритона в наноструктуре из первой нанокомпозитной среды с матрицей из полиметилметакрилата и наноразмерными включениями в виде наночастиц золота с фактором заполнения $f_1 = 15\,\%$, радиусом наночастиц $a_1 = 12.5\,$нм, и второй среды из стекла ВК5. Буквами обозначены: а) $p_{x01}(\lambda)/p_0$, б) $p_{z01}(\lambda)/p_0$, в) $p_{x12}(\lambda)/p_0$, г) $p_{z12}(\lambda)/p_0$.

Из графиков плотности потока энергии поверхностной электромагнитной волны видно, что возможно распространение поверхностных плазмон-поляритонов по двум границам раздела нанокомпозитной плёнки, граничащей с диэлектрическими средами.

Заключение

В работе описан физический процесс распространения поверхностного плазмон-поляритона на границе диэлектрической среды и нанокомпозитной среды, находящейся во внешнем поле оптической волны. В данной работе рассчитывается плотность потока энергии поверхностного плазмон-поляритона, распространяющегося на границе раздела диэлектрической среды и нанокомпозитной среды, содержащей металлические

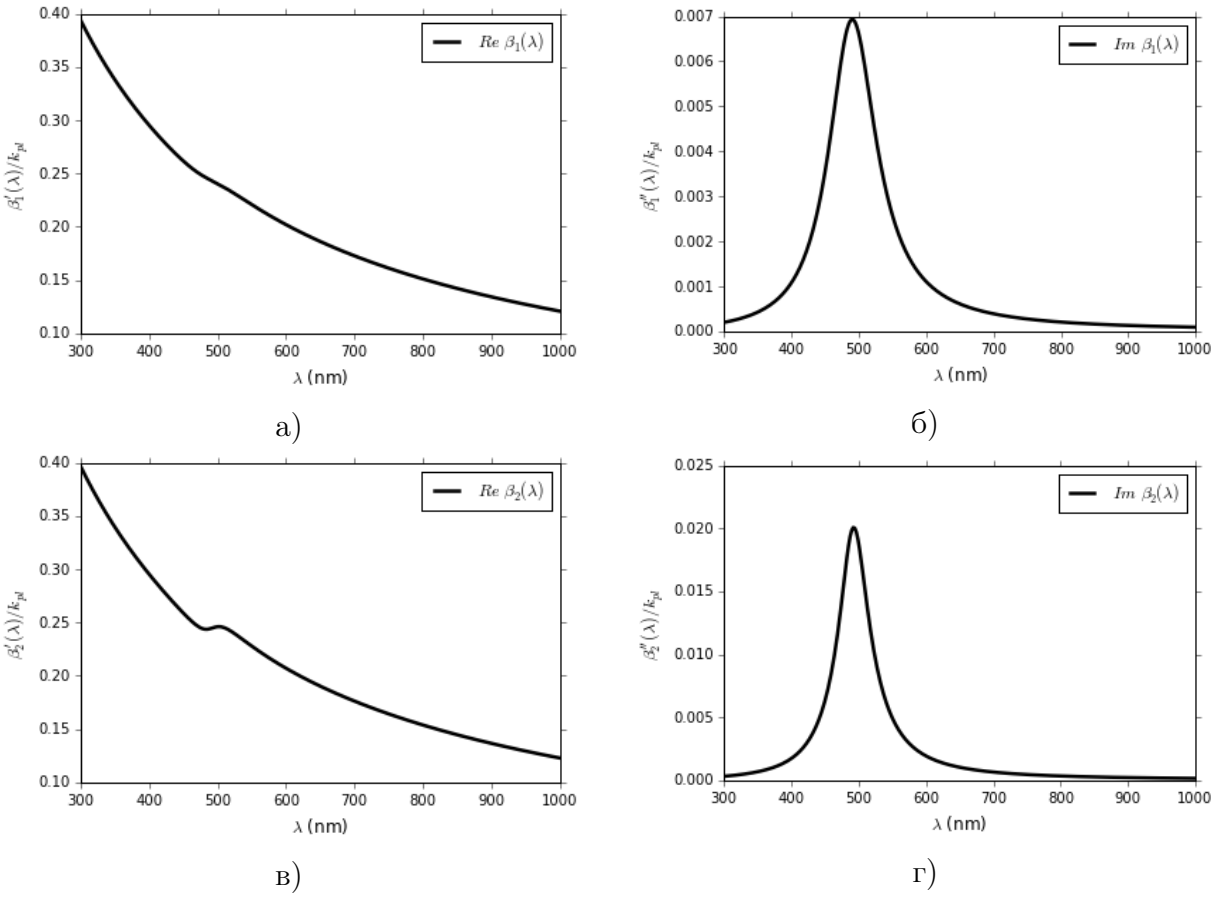


Рис. 3. Зависимость константы распространения поверхностного плазмон-поляритона в наноструктуре из первой нанокомпозитной среды с матрицей из полиметилметакрилата и наноразмерными включениями в виде наночастиц золота с фактором заполнения $f_1 = 2\,\%$, радиусом наночастиц $a_1 = 2.5\,$нм, и второй среды из стекла ВК5. Буквами обозначены: а) $\mathrm{Re}\{\beta_1(\lambda)\}/k_{\mathrm{pl}}$, б) $\mathrm{Im}\{\beta_1(\lambda)\}/k_{\mathrm{pl}}$, в) $\mathrm{Re}\{\beta_2(\lambda)\}/k_{\mathrm{pl}}$, г) $\mathrm{Im}\{\beta_2(\lambda)\}/k_{\mathrm{pl}}$.

наночастицы.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. проведённый анализ научной литературы по наноплазмонике позволил выявить актуальные направления для компьютерного моделирования физических характеристик процесса распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита, а также показана перспективность физической реализации наноплазмонных устройств на поверхностных плазмон-поляритонах путём применения металл-диэлектрических наноструктур,
2. построенная модифицированная теоретическая модель процесса распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита позволяет прогнозировать физические свойства поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся вдоль границы раздела диэлектрика и нанокомпозита,
3. компьютерная программа, которая была написана на языке программирования Python, позволяет вычислять оптические характеристики поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся вдоль границы раздела диэлектрика и нанокомпозита,
4. в результате численных расчётов оптических характеристик процесса распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита получены зависимости плотности потока энергии электромагнит-

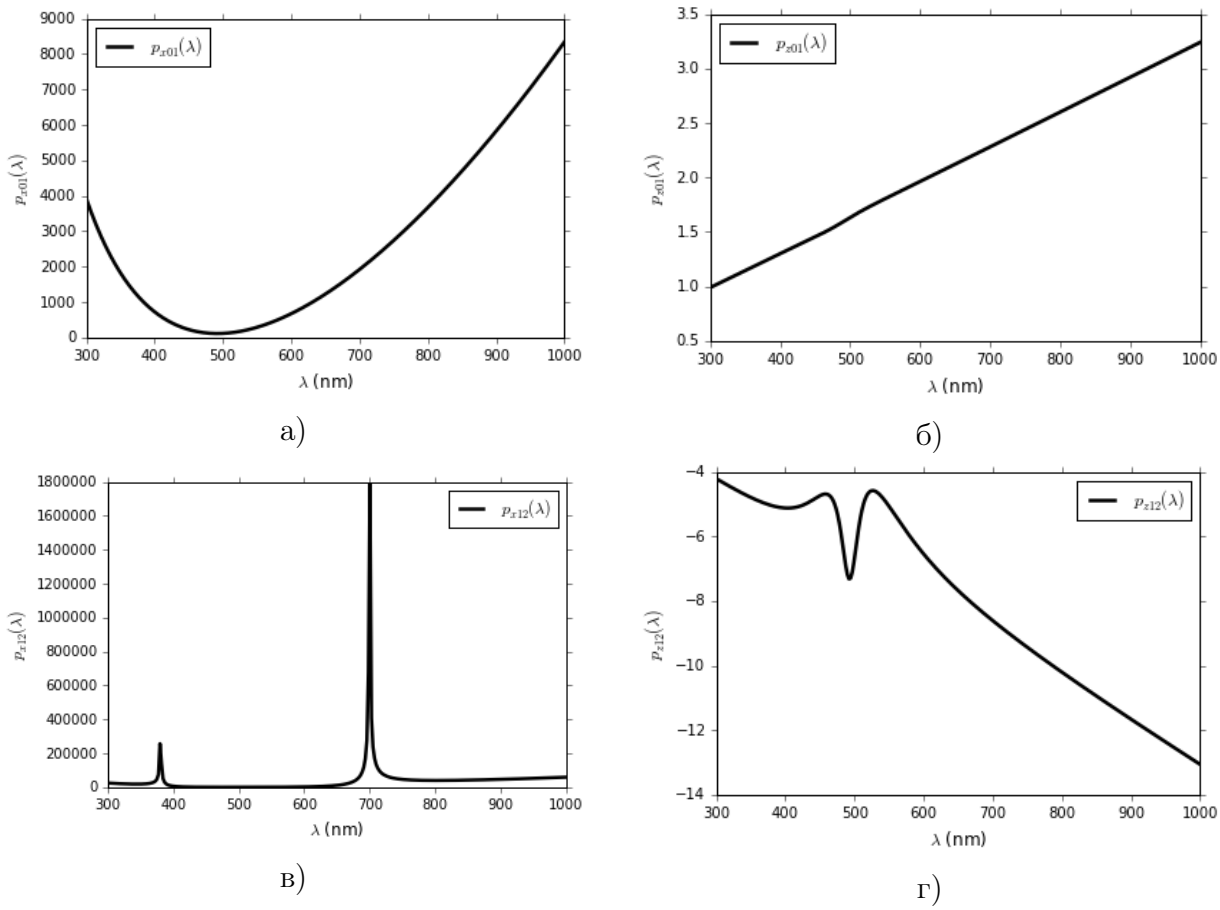


Рис. 4. Зависимость усреднённого потока энергии электромагнитной волны поверхностного плазмон-поляритона в наноструктуре из первой нанокомпозитной среды с матрицей из полиметилметакрилата и наноразмерными включениями в виде наночастиц золота с фактором заполнения $f_1 = 2\,\%$, радиусом наночастиц $a_1 = 2.5\,$нм, и второй среды из стекла ВК5. Буквами обозначены: а) $p_{x01}\,(\lambda)/p_0$, б) $p_{z01}\,(\lambda)/p_0$, в) $p_{x12}\,(\lambda)/p_0$, г) $p_{z12}\,(\lambda)/p_0$.

ных волн поверхностных плазмон-поляритонов от длины волны внешнего оптического излучения, которые показали возможность распространения поверхностных плазмон-поляритонов по двум границам раздела нанокомпозитной плёнки, граничащей с диэлектрическими средами.

5. произведённый численный расчёт усреднённых значений компонент вектора Умова-Пойнтинга для поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита подтверждает наличие максимумов плотности потока энергии, соответствующих распространению плазмон-поляритона вдоль границы раздела диэлектрика и нанокомпозита.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если выявить особенности процесса распространения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела диэлектрика и нанокомпозита, то можно успешно прогнозировать физические свойства приборов и устройств наноплазмоники, подтверждена полностью.

Список использованных источников

1. Huang Kun. Lattice Vibrations and Optical Waves in Ionic Crystals // Nature. — 1951. — may. — Vol. 167, no. 4254. — P. 779–780. — URL: https://doi.org/10.1038/167779b0.

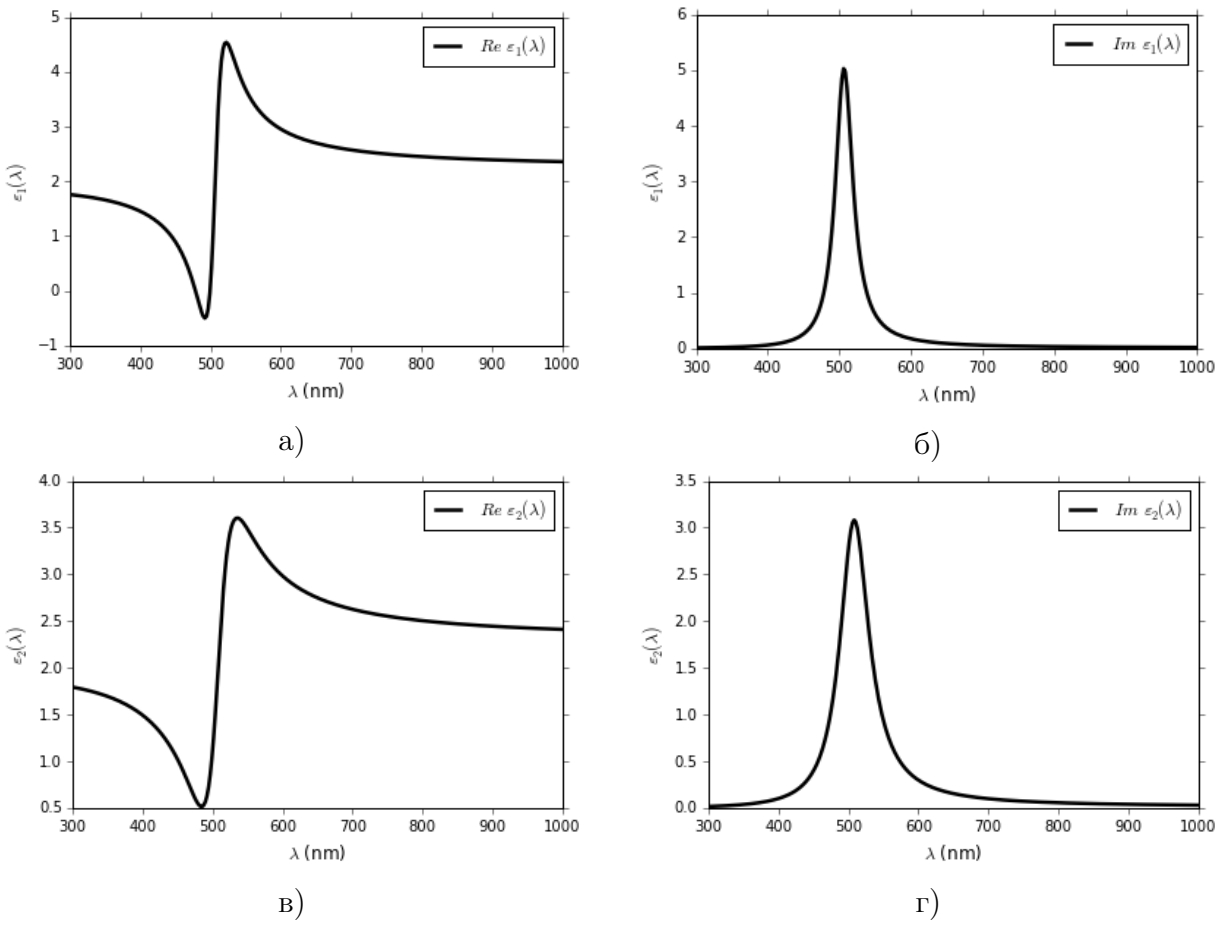


Рис. 5. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости наноструктуры из первой нанокомпозитной среды с матрицей из полиметилметакрилата и наноразмерными включениями в виде наночастиц золота с фактором заполнения $f_1 = 15\,\%$, радиусом наночастиц $a_1 = 12.5\,$нм, и второй среды из стекла ВК5. Буквами обозначены: а) $\mathrm{Re}\{\varepsilon_1(\lambda)\}$, б) $\mathrm{Im}\{\varepsilon_1(\lambda)\}$, в) $\mathrm{Re}\{\varepsilon_2(\lambda)\}$, г) $\mathrm{Im}\{\varepsilon_2(\lambda)\}$.

2. Ritchie R. H. Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films // Physical Review. — 1957. — jun. — Vol. 106, no. 5. — P. 874–881. — URL: https://doi.org/10.1103/physrev.106.874.

3. Band shaping and emission control via waveguide plasmon polaritons / Augusto Martins [et al.] // Physical Review B. — 2021. — may. — Vol. 103, no. 20. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.205423.

4. Sierant Aleksandra, Jany Benedykt R., Kawalec Tomasz. Near-field characterization of surface plasmon polaritons on a nanofabricated transmission structure // Physical Review B. — 2021. — apr. — Vol. 103, no. 16. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.165433.

5. Sokolik Alexey A., Kotov Oleg V., Lozovik Yurii E. Plasmonic modes at inclined edges of anisotropic two-dimensional materials // Physical Review B. — 2021. — apr. — Vol. 103, no. 15. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.155402.

6. Zhang Junxi, Zhang Lide, Xu Wei. Surface plasmon polaritons: physics and applications // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2012. — feb. — Vol. 45, no. 11. — P. 113001. — URL: https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/11/113001.

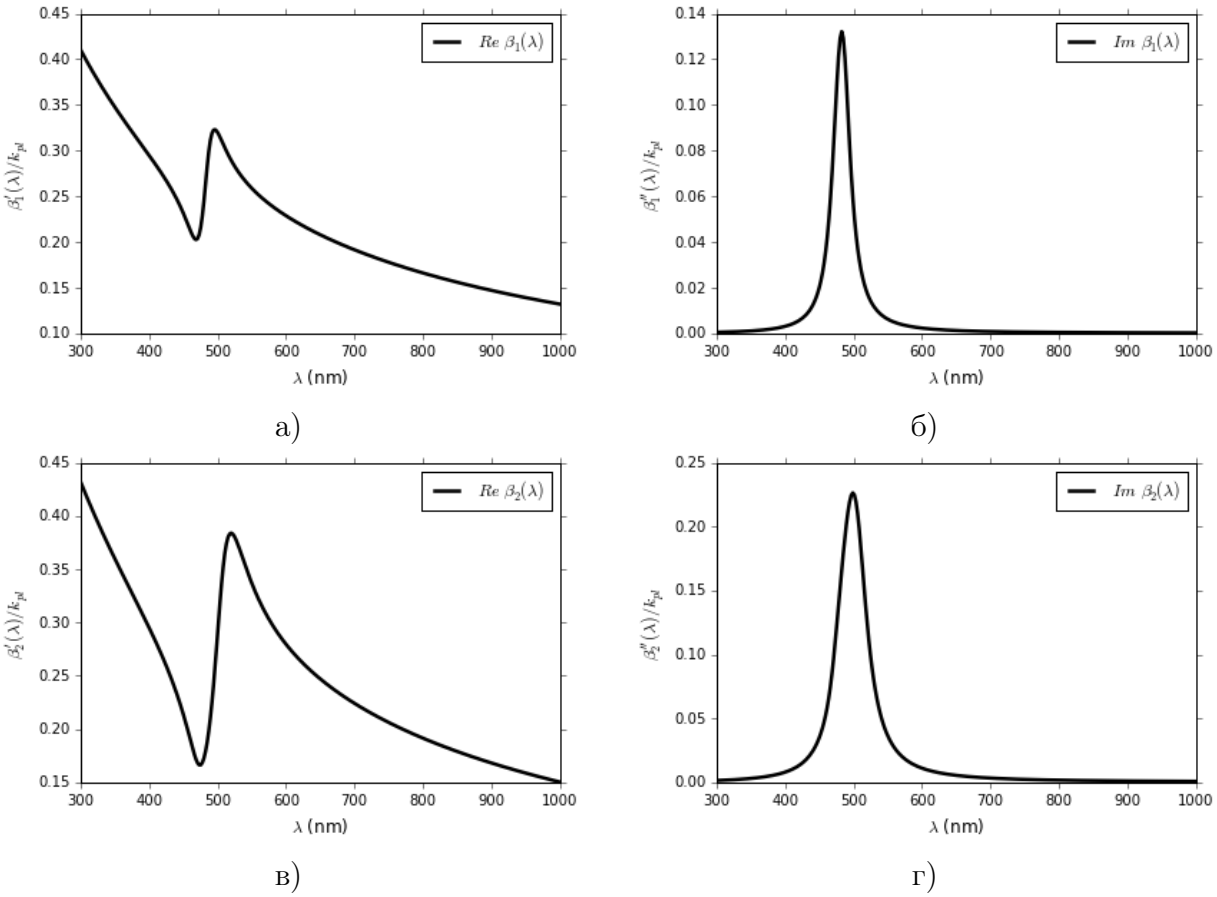


Рис. 6. Зависимость константы распространения поверхностного плазмон-поляритона в наноструктуре из первой нанокомпозитной среды с матрицей из полиметилметакрилата и наноразмерными включениями в виде наночастиц золота с фактором заполнения $f_1 = 15\,\%$, радиусом наночастиц $a_1 = 12.5\,$нм, и второй среды из стекла ВК5. Буквами обозначены: а) $\mathrm{Re}\{\beta_1(\lambda)\}/k_{\mathrm{pl}}$, б) $\mathrm{Im}\{\beta_1(\lambda)\}/k_{\mathrm{pl}}$, в) $\mathrm{Re}\{\beta_2(\lambda)\}/k_{\mathrm{pl}}$, г) $\mathrm{Im}\{\beta_2(\lambda)\}/k_{\mathrm{pl}}$.

7. Rituraj, Orenstein Meir, Fan Shanhui. Photonic Chern insulators from two-dimensional atomic lattices interacting with a single surface plasmon polariton // Physical Review B. — 2021. — mar. — Vol. 103, no. 12. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.125423.

8. Rituraj, Orenstein Meir, Fan Shanhui. Interaction of two-dimensional atomic lattices with a single surface plasmon polariton // Physical Review A. — 2021. — feb. — Vol. 103, no. 2. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.103.023716.

9. Performance limitations of active plasmonic devices based on magnetic field detuning of the surface plasmon-polariton resonance in subwavelength semiconductor wires / Kil-Song Song [et al.] // Physical Review B. — 2021. — feb. — Vol. 103, no. 7. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.075425.

10. Spontaneous surface plasmon polariton decay of band-edge excitons in quantum dots near a metal surface / Qiang Gao [et al.] // Physical Review B. — 2021. — jan. — Vol. 103, no. 3. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.035416.

11. Trapping effect and trajectory control of surface plasmon polaritons in a metal-dielectric-metal waveguide / Yong Zhou [et al.] // Physical Review A. — 2020. — dec. — Vol. 102, no. 6. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.102.063516.

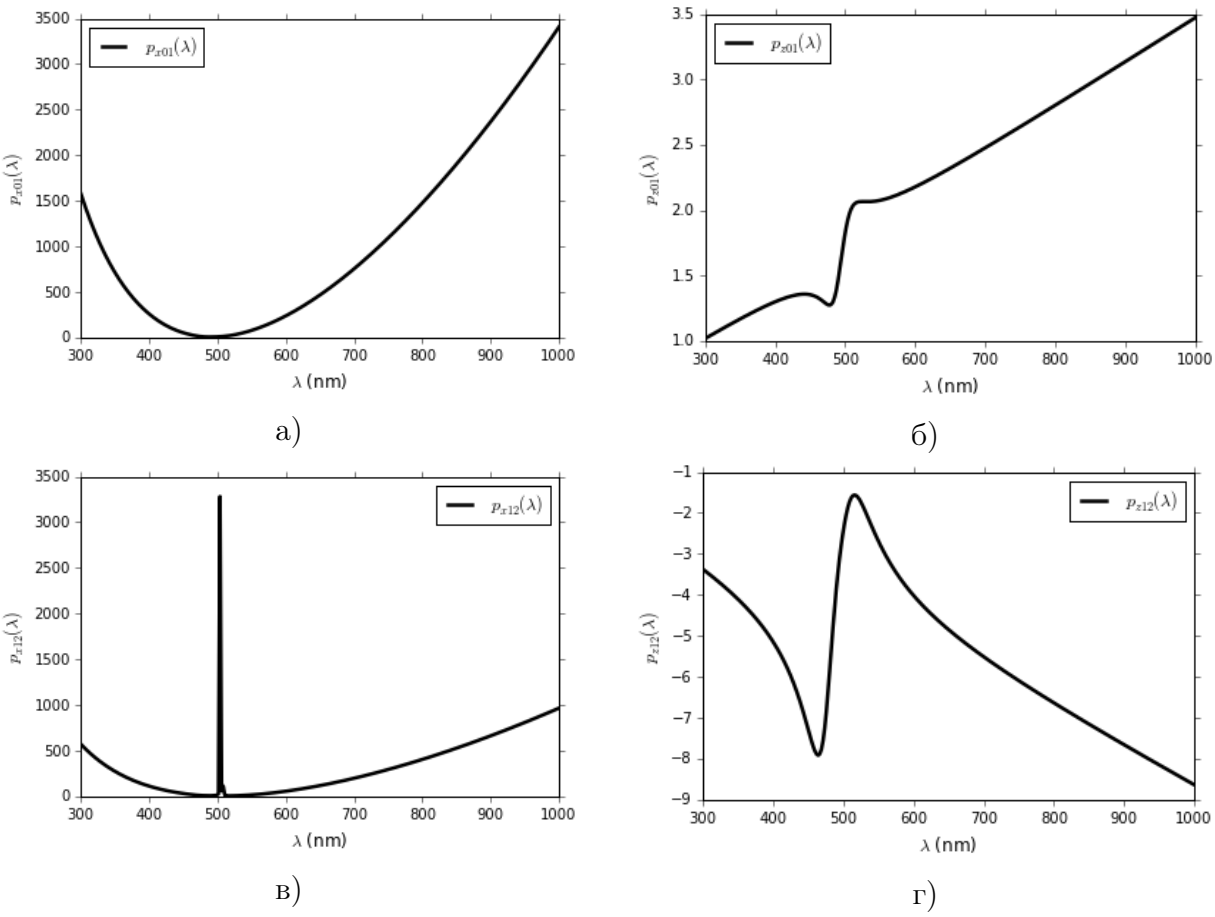


Рис. 7. Зависимость усреднённого потока энергии электромагнитной волны поверхностного плазмон-поляритона в наноструктуре из первой нанокомпозитной среды с матрицей из полиметилметакрилата и наноразмерными включениями в виде наночастиц золота с фактором заполнения $f_1 = 15\,\%$, радиусом наночастиц $a_1 = 12.5\,$нм, и второй среды из стекла ВК5. Буквами обозначены: а) $p_{x01}\,(\lambda)/p_0$, б) $p_{z01}\,(\lambda)/p_0$, в) $p_{x12}\,(\lambda)/p_0$, г) $p_{z12}\,(\lambda)/p_0$.

12. Theoretical study of anisotropy-induced extrinsic chirality and chiral discrimination of surface plasmon polaritons / Qiang Zhang [et al.] // Physical Review A. — 2020. — oct. — Vol. 102, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.102.043502.

13. Enhanced magneto-optical Faraday effect in two-dimensional magnetoplasmonic structures caused by orthogonal plasmonic oscillations / D. M. Krichevsky [et al.] // Physical Review B. — 2020. — oct. — Vol. 102, no. 14. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.102.144408.

14. Integrated Plasmonics: Broadband Dirac Plasmons in Borophene / Chao Lian [et al.] // Physical Review Letters. — 2020. — sep. — Vol. 125, no. 11. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.125.116802.

15. Bugaiko O. V., Gorbar E. V., Sukhachov P. O. Surface plasmon polaritons in strained Weyl semimetals // Physical Review B. — 2020. — aug. — Vol. 102, no. 8. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.102.085426.

16. Asymmetric Excitation of Surface Plasmon Polaritons via Paired Slot Antennas for Angstrom Displacement Sensing / Tianyang Zang [et al.] // Physical Review Letters. —

2020. — jun. — Vol. 124, no. 24. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.124.243901.

17. Topological Gaseous Plasmon Polariton in Realistic Plasma / Jeffrey B. Parker [et al.] // Physical Review Letters. — 2020. — may. — Vol. 124, no. 19. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.124.195001.

18. Oue Daigo, Matsuo Mamoru. Electron spin transport driven by surface plasmon polaritons // Physical Review B. — 2020. — apr. — Vol. 101, no. 16. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.101.161404.

19. Large nonreciprocal absorption and emission of radiation in type-I Weyl semimetals with time reversal symmetry breaking / Yoichiro Tsurimaki [et al.] // Physical Review B. — 2020. — apr. — Vol. 101, no. 16. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.101.165426.

20. Quantization of graphene plasmons / Beatriz A. Ferreira [et al.] // Physical Review A. — 2020. — mar. — Vol. 101, no. 3. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.101.033817.

21. Ratnikov Pavel V. Surface plasmon polaritons in planar graphene superlattices // Physical Review B. — 2020. — mar. — Vol. 101, no. 12. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.101.125301.

22. Evaluation of surface roughness of metal films using plasmonic Fano resonance in attenuated total reflection / Munehiro Nishida [et al.] // Physical Review B. — 2020. — feb. — Vol. 101, no. 8. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.101.085414.

23. Sehmi H. S., Langbein W., Muljarov E. A. Applying the resonant-state expansion to realistic materials with frequency dispersion // Physical Review B. — 2020. — jan. — Vol. 101, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.101.045304.

24. Second harmonic conversions of surface-plasmon-polariton enhanced optical fields in nonlinear optics polymer/Ag/glass structures / Atsushi Sugita [et al.] // Physical Review B. — 2020. — jan. — Vol. 101, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.101.045303.

25. Frolov A. Yu., Shcherbakov M. R., Fedyanin A. A. Dark mode enhancing magneto-optical Kerr effect in multilayer magnetoplasmonic crystals // Physical Review B. — 2020. — jan. — Vol. 101, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.101.045409.

26. Theory for the stationary polariton response in the presence of vibrations / Kalle S. U. Kansanen [et al.] // Physical Review B. — 2019. — dec. — Vol. 100, no. 24. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.100.245426.

27. Edge-plasmon assisted electro-optical modulator / Ivan A. Pshenichnyuk [et al.] // Physical Review B. — 2019. — nov. — Vol. 100, no. 19. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.100.195434.

28. Influence of spatial dispersion on spectral tuning of phonon-polaritons / Thomas E. Beechem [et al.] // Physical Review B. — 2019. — nov. — Vol. 100, no. 20. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.100.205419.

29. Partially coherent surface plasmon polariton vortex fields / Yahong Chen [et al.] // Physical Review A. — 2019. — nov. — Vol. 100, no. 5. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.100.053833.

30. Nanoscale magnetization and third-order nonlinearity by the plasmon-induced inverse Faraday effect in graphene-covered semiconductors / Chol-Song Ri [et al.] // Physical Review B. — 2019. — oct. — Vol. 100, no. 15. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.100.155404.

31. Zhou Chenzhang, Mackay Tom G., Lakhtakia Akhlesh. Surface-plasmon-polariton wave propagation supported by anisotropic materials: Multiple modes and mixed exponential and linear localization characteristics // Physical Review A. — 2019. — sep. — Vol. 100, no. 3. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.100.033809.

32. Panahpour Ali, Mahmoodpoor Abolfazl, Lavrinenko Andrei V. Refraction enhancement in plasmonics by coherent control of plasmon resonances // Physical Review B. — 2019. — aug. — Vol. 100, no. 7. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.100.075427.

33. Ozawa Keisuke, Yamamoto Naoki. Ridge reflection of surface plasmon-polaritons in a one-dimensional plasmonic cavity // Physical Review B. — 2019. — aug. — Vol. 100, no. 7. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.100.075406.

34. Ultrafast transport and relaxation of hot plasmonic electrons in metal-dielectric heterostructures / Ilya Razdolski [et al.] // Physical Review B. — 2019. — jul. — Vol. 100, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.100.045412.

35. Unidirectional and diffractionless surface plasmon polaritons on three-dimensional nonreciprocal plasmonic platforms / S. Ali Hassani Gangaraj [et al.] // Physical Review B. — 2019. — jun. — Vol. 99, no. 24. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.99.245414.

36. Coupling of atomic quadrupole transitions with resonant surface plasmons / Eng Aik Chan [et al.] // Physical Review A. — 2019. — jun. — Vol. 99, no. 6. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.99.063801.

37. Mixing the Light Spin with Plasmon Orbit by Nonlinear Light-Matter Interaction in Gold / G. Spektor [et al.] // Physical Review X. — 2019. — may. — Vol. 9, no. 2. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevx.9.021031.

38. Kamran Muhammad, Faryad Muhammad. Excitation of surface plasmon polariton waves along the direction of periodicity of a one-dimensional photonic crystal // Physical Review A. — 2019. — may. — Vol. 99, no. 5. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.99.053811.

39. Measurement of the Photon-Plasmon Coupling Phase Shift / Akbar Safari [et al.] // Physical Review Letters. — 2019. — apr. — Vol. 122, no. 13. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.122.133601.

40. Otten M., Gray S. K., Kolmakov G. V. Optical detection and storage of entanglement in plasmonically coupled quantum-dot qubits // Physical Review A. — 2019. — mar. — Vol. 99, no. 3. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.99.032339.

41. Optical binding via surface plasmon polariton interference / Natalia Kostina [et al.] // Physical Review B. — 2019. — mar. — Vol. 99, no. 12. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.99.125416.

42. Nonlinear Emission of Molecular Ensembles Strongly Coupled to Plasmonic Lattices with Structural Imperfections / Mohammad Ramezani [et al.] // Physical Review Letters. — 2018. — dec. — Vol. 121, no. 24. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.121.243904.

43. Variational schemes and geometric simulations for a hydrodynamic-electrodynamic model of surface plasmon polaritons / Qiang Chen [et al.] // Physical Review E. — 2019. — feb. — Vol. 99, no. 2. — URL: https://doi.org/10.1103/physreve.99.023313.

44. Andreeva Vera, Luskin Mitchell, Margetis Dionisios. Nonperturbative nonlinear effects in the dispersion relations for TE and TM plasmons on two-dimensional materials // Physical Review B. — 2018. — nov. — Vol. 98, no. 19. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.98.195407.

45. Experimental observation of hybrid TE-TM polarized surface waves supported by a hyperbolic metasurface / Oleh Y. Yermakov [et al.] // Physical Review B. — 2018. — nov. — Vol. 98, no. 19. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.98.195404.

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

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

E-mail: prichalova.katya@bk.ru
ORCID iD 0000-0003-4632-6420
Web of Science ResearcherID ABB-9731-2021

Investigation of the propagation of a surface plasmon-polariton at the interface between a dielectric and a nanocomposite

K. K. Altunin, E. N. Prichalova

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted April 5, 2021
Resubmitted April 12, 2021
Published September 9, 2021

Abstract. The physical process of propagation of a surface plasmon polariton at the interface between a dielectric and a nanocomposite is considered. A modified theoretical model of the propagation of surface plasmon polaritons at the interface between a dielectric and a nanocomposite is constructed. A computer program has been written that makes it possible to calculate the optical characteristics of surface plasmon polaritons propagating along the interface between a dielectric and a nanocomposite. The energy flux density of a surface plasmon polariton propagating at the interface between a dielectric medium and a nanocomposite medium containing metal nanoparticles is calculated. As a result of numerical calculations, the dependences of the energy flux density of electromagnetic waves of surface plasmon polaritons on the wavelength of external optical radiation for surface plasmon polaritons propagating at the interface between a dielectric and a nanocomposite are obtained. The numerical calculation of the averaged values of the components of the Poynting vector for the surface plasmon-polariton at the dielectric-nanocomposite interface confirms the presence of energy flux density maxima corresponding to the propagation of the plasmon-polariton along the dielectric-nanocomposite interface.

Keywords: plasmon, polariton, plasmon-polariton, nanocomposite film, nanocomposite medium, metal nanoparticles, silver nanoparticles, dielectric, optical radiation, electromagnetic wave

PACS: 42.25.Bs

References

1. Band shaping and emission control via waveguide plasmon polaritons / Augusto Martins [et al.] // Physical Review B. — 2021. — may. — Vol. 103, no. 20. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.205423.

2. Sierant Aleksandra, Jany Benedykt R., Kawalec Tomasz. Near-field characterization of surface plasmon polaritons on a nanofabricated transmission structure // Physical Review B. — 2021. — apr. — Vol. 103, no. 16. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.165433.

3. Sokolik Alexey A., Kotov Oleg V., Lozovik Yurii E. Plasmonic modes at inclined edges of anisotropic two-dimensional materials // Physical Review B. — 2021. — apr. — Vol. 103, no. 15. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.155402.

4. Zhang Junxi, Zhang Lide, Xu Wei. Surface plasmon polaritons: physics and applications // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2012. — feb. — Vol. 45, no. 11. — P. 113001. — URL: https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/11/113001.

5. Rituraj, Orenstein Meir, Fan Shanhui. Photonic Chern insulators from two-dimensional atomic lattices interacting with a single surface plasmon polariton // Physical Review B. — 2021. — mar. — Vol. 103, no. 12. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.125423.

6. Rituraj, Orenstein Meir, Fan Shanhui. Interaction of two-dimensional atomic lattices with a single surface plasmon polariton // Physical Review A. — 2021. — feb. — Vol. 103, no. 2. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.103.023716.

7. Performance limitations of active plasmonic devices based on magnetic field detuning of the surface plasmon-polariton resonance in subwavelength semiconductor wires / Kil-Song Song [et al.] // Physical Review B. — 2021. — feb. — Vol. 103, no. 7. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.075425.

8. Spontaneous surface plasmon polariton decay of band-edge excitons in quantum dots near a metal surface / Qiang Gao [et al.] // Physical Review B. — 2021. — jan. — Vol. 103, no. 3. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.035416.

9. Trapping effect and trajectory control of surface plasmon polaritons in a metal-dielectric-metal waveguide / Yong Zhou [et al.] // Physical Review A. — 2020. — dec. — Vol. 102, no. 6. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.102.063516.

10. Theoretical study of anisotropy-induced extrinsic chirality and chiral discrimination of surface plasmon polaritons / Qiang Zhang [et al.] // Physical Review A. — 2020. — oct. — Vol. 102, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.102.043502.

11. Enhanced magneto-optical Faraday effect in two-dimensional magnetoplasmonic structures caused by orthogonal plasmonic oscillations / D. M. Krichevsky [et al.] // Physical Review B. — 2020. — oct. — Vol. 102, no. 14. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.102.144408.

12. Integrated Plasmonics: Broadband Dirac Plasmons in Borophene / Chao Lian [et al.] // Physical Review Letters. — 2020. — sep. — Vol. 125, no. 11. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.125.116802.

13. Bugaiko O. V., Gorbar E. V., Sukhachov P. O. Surface plasmon polaritons in strained Weyl semimetals // Physical Review B. — 2020. — aug. — Vol. 102, no. 8. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.102.085426.

14. Huang Kun. Lattice Vibrations and Optical Waves in Ionic Crystals // Nature. — 1951. — may. — Vol. 167, no. 4254. — P. 779–780. — URL: https://doi.org/10.1038/167779b0.

15. Ritchie R. H. Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films // Physical Review. — 1957. — jun. — Vol. 106, no. 5. — P. 874–881. — URL: https://doi.org/10.1103/physrev.106.874.

16. Asymmetric Excitation of Surface Plasmon Polaritons via Paired Slot Antennas for Angstrom Displacement Sensing / Tianyang Zang [et al.] // Physical Review Letters. — 2020. — jun. — Vol. 124, no. 24. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.124.243901.

17. Topological Gaseous Plasmon Polariton in Realistic Plasma / Jeffrey B. Parker [et al.] // Physical Review Letters. — 2020. — may. — Vol. 124, no. 19. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.124.195001.

18. Oue Daigo, Matsuo Mamoru. Electron spin transport driven by surface plasmon polaritons // Physical Review B. — 2020. — apr. — Vol. 101, no. 16. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.101.161404.

19. Large nonreciprocal absorption and emission of radiation in type-I Weyl semimetals with time reversal symmetry breaking / Yoichiro Tsurimaki [et al.] // Physical Review B. — 2020. — apr. — Vol. 101, no. 16. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.101.165426.

20. Quantization of graphene plasmons / Beatriz A. Ferreira [et al.] // Physical Review A. — 2020. — mar. — Vol. 101, no. 3. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.101.033817.

21. Ratnikov Pavel V. Surface plasmon polaritons in planar graphene superlattices // Physical Review B. — 2020. — mar. — Vol. 101, no. 12. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.101.125301.

22. Evaluation of surface roughness of metal films using plasmonic Fano resonance in attenuated total reflection / Munehiro Nishida [et al.] // Physical Review B. — 2020. — feb. — Vol. 101, no. 8. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.101.085414.

23. Sehmi H. S., Langbein W., Muljarov E. A. Applying the resonant-state expansion to realistic materials with frequency dispersion // Physical Review B. — 2020. — jan. — Vol. 101, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.101.045304.

24. Second harmonic conversions of surface-plasmon-polariton enhanced optical fields in nonlinear optics polymer/Ag/glass structures / Atsushi Sugita [et al.] // Physical Review B. — 2020. — jan. — Vol. 101, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.101.045303.

25. Frolov A. Yu., Shcherbakov M. R., Fedyanin A. A. Dark mode enhancing magneto-optical Kerr effect in multilayer magnetoplasmonic crystals // Physical Review B. — 2020. — jan. — Vol. 101, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.101.045409.

26. Theory for the stationary polariton response in the presence of vibrations / Kalle S. U. Kansanen [et al.] // Physical Review B. — 2019. — dec. — Vol. 100, no. 24. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.100.245426.

27. Edge-plasmon assisted electro-optical modulator / Ivan A. Pshenichnyuk [et al.] // Physical Review B. — 2019. — nov. — Vol. 100, no. 19. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.100.195434.

28. Influence of spatial dispersion on spectral tuning of phonon-polaritons / Thomas E. Beechem [et al.] // Physical Review B. — 2019. — nov. — Vol. 100, no. 20. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.100.205419.

29. Partially coherent surface plasmon polariton vortex fields / Yahong Chen [et al.] // Physical Review A. — 2019. — nov. — Vol. 100, no. 5. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.100.053833.

30. Nanoscale magnetization and third-order nonlinearity by the plasmon-induced inverse Faraday effect in graphene-covered semiconductors / Chol-Song Ri [et al.] // Physical Review B. — 2019. — oct. — Vol. 100, no. 15. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.100.155404.

31. Zhou Chenzhang, Mackay Tom G., Lakhtakia Akhlesh. Surface-plasmon-polariton wave propagation supported by anisotropic materials: Multiple modes and mixed exponential and linear localization characteristics // Physical Review A. — 2019. — sep. — Vol. 100, no. 3. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.100.033809.

32. Panahpour Ali, Mahmoodpoor Abolfazl, Lavrinenko Andrei V. Refraction enhancement in plasmonics by coherent control of plasmon resonances // Physical Review B. — 2019. — aug. — Vol. 100, no. 7. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.100.075427.

33. Ozawa Keisuke, Yamamoto Naoki. Ridge reflection of surface plasmon-polaritons in a one-dimensional plasmonic cavity // Physical Review B. — 2019. — aug. — Vol. 100, no. 7. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.100.075406.

34. Ultrafast transport and relaxation of hot plasmonic electrons in metal-dielectric heterostructures / Ilya Razdolski [et al.] // Physical Review B. — 2019. — jul. — Vol. 100, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.100.045412.

35. Unidirectional and diffractionless surface plasmon polaritons on three-dimensional nonreciprocal plasmonic platforms / S. Ali Hassani Gangaraj [et al.] // Physical Review B. — 2019. — jun. — Vol. 99, no. 24. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.99.245414.

36. Coupling of atomic quadrupole transitions with resonant surface plasmons / Eng Aik Chan [et al.] // Physical Review A. — 2019. — jun. — Vol. 99, no. 6. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.99.063801.

37. Mixing the Light Spin with Plasmon Orbit by Nonlinear Light-Matter Interaction in Gold / G. Spektor [et al.] // Physical Review X. — 2019. — may. — Vol. 9, no. 2. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevx.9.021031.

38. Kamran Muhammad, Faryad Muhammad. Excitation of surface plasmon polariton waves along the direction of periodicity of a one-dimensional photonic crystal // Physical Review A. — 2019. — may. — Vol. 99, no. 5. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.99.053811.

39. Measurement of the Photon-Plasmon Coupling Phase Shift / Akbar Safari [et al.] // Physical Review Letters. — 2019. — apr. — Vol. 122, no. 13. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.122.133601.

40. Otten M., Gray S. K., Kolmakov G. V. Optical detection and storage of entanglement in plasmonically coupled quantum-dot qubits // Physical Review A. — 2019. — mar. — Vol. 99, no. 3. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.99.032339.

41. Optical binding via surface plasmon polariton interference / Natalia Kostina [et al.] // Physical Review B. — 2019. — mar. — Vol. 99, no. 12. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.99.125416.

42. Nonlinear Emission of Molecular Ensembles Strongly Coupled to Plasmonic Lattices with Structural Imperfections / Mohammad Ramezani [et al.] // Physical Review Letters. — 2018. — dec. — Vol. 121, no. 24. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.121.243904.

43. Variational schemes and geometric simulations for a hydrodynamic-electrodynamic model of surface plasmon polaritons / Qiang Chen [et al.] // Physical Review E. — 2019. — feb. — Vol. 99, no. 2. — URL: https://doi.org/10.1103/physreve.99.023313.

44. Andreeva Vera, Luskin Mitchell, Margetis Dionisios. Nonperturbative nonlinear effects in the dispersion relations for TE and TM plasmons on two-dimensional materials // Physical Review B. — 2018. — nov. — Vol. 98, no. 19. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.98.195407.

45. Experimental observation of hybrid TE-TM polarized surface waves supported by a hyperbolic metasurface / Oleh Y. Yermakov [et al.] // Physical Review B. — 2018. — nov. — Vol. 98, no. 19. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.98.195404.

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 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

Ekaterina Nikolaevna Prichalova — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: prichalova.katya@bk.ru
ORCID iD 0000-0003-4632-6420
Web of Science ResearcherID ABB-9731-2021

УДК 535.3
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 01.04.05

Разработка дистанционного курса по факультативному курсу “Нанотехнологии в современном мире”

К. К. Алтунин [1]

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

Поступила в редакцию 11 июня 2021 года
После переработки 16 июля 2021 года
Опубликована 9 сентября 2021 года

Аннотация. Рассмотрен процесс создания материалов и элементов дистанционного курса по факультативному курсу “Нанотехнологии в современном мире”. Систематизация теории по физическим основам нанотехнологии позволила наполнить теоретическими материалами дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире». Разработаны элементы модулей дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире» позволяющие контролировать усвоение знаний по физике от репродуктивного до творческого уровня. В составе дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире» представлены элементы для проверки теоретических знаний по физическим основам нанотехнологии, позволяющая организовать автоматизированную проверку знаний по физическим основам курса. Разработаны элементы модулей дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире», позволяющие контролировать усвоение знаний по физике от репродуктивного до творческого уровня. Использование дистанционного курса в качестве факультативного курса “Нанотехнологии в современном мире” способствует повышению эффективности самостоятельной работы, обеспечению визуализации процесса обучения, повышению эффективности управления обучением с использованием возможностей системы MOODLE. Дистанционный курс «Нанотехнологии в современном мире» может быть использован при проведении факультативных курсов в области междисциплинарных исследований по физике и физическим основам нанотехнологии.

Ключевые слова: физика, нанотехнологии, дистанционный курс, элемент курса, факультативный курс, проверка знаний, усвоение знаний, система управления обучением

PACS: 01.40.-d

Введение

Данная работа посвящена исследованию процесса разработки дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире» в системе управления обучения MOODLE.

Целью работы является теоретическое исследование различных оптических свойств наноструктурных материалов.

[1] E-mail: kostya_altunin@mail.ru

Задачей исследования является разработка теоретических и контролирующих элементов дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире» в системе управления обучения MOODLE, систематизация теоретических материалов по физическим основам нанотехнологии для использования в теоретической части разрабатываемого курса «Нанотехнологии в современном мире».

Объектом исследования является курс «Нанотехнологии в современном мире».

Предметом исследования является процесс разработки совокупности элементов дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире» в системе управления обучения MOODLE.

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

Научная новизна работы заключается в использовании дистанционных образовательных технологий в процессе изучения фундаментальных понятий, законов и процессов нанотехнологий.

В качестве методов исследования используется анализ теоретических материалов по нанотехнологиям и наноэлектронике, синтез различных концепций описания физических процессов нанотехнологий и наноэлектроники, проектирование дистанционного курса по нанотехнологиям. В качестве материалов исследования используются теоретические материалы по нанотехнологиям и наноэлектронике.

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

Практическая значимость исследования заключается в выявлении характерных особенностей процесса разработки дистанционного курса по нанотехнологиям.

Обзор работ по нанотехнологиям

Нанотехнология включает в себя понимание фундаментальной физики, химии, биологии и технологии объектов нанометрового масштаба. Нанотехнология заключается использовании вещества в атомном, молекулярном и надмолекулярном масштабе для промышленных целей.

Наноэлектроника — это термин, используемый в области нанотехнологий для электронных компонентов и исследований по усовершенствованию электроники, такой как дисплей, размер и потребляемая мощность устройства для практического использования. Сюда входят исследования микросхем памяти и физических модификаций электронных устройств. Наноэлектроника охватывает квантовомеханические свойства гибридных материалов, полупроводников, одномерных нанотрубок, нанопроволок. Развитая наноэлектроника может применяться в различных областях и особенно полезна для обнаружения болезнетворных агентов и биомаркеров болезней.

Первым обсуждением молекулярной наноэлектроники было предложение Авирама и Ратнера в 1974 году создать выпрямитель из органических молекул. Первый пример одиночного молекулярного электронного устройства не появлялся до 1990 года, основная проблема заключалась в сложности создания отдельных электрических контактов с молекулами, размер которых может составлять всего несколько нанометров. Развитие сканирующего туннельного микроскопа в основном позволило начать первые

измерения в этой области и остается одним из основных инструментов для определения электрических характеристик отдельных молекул.

Наноэлектроника стала реальностью, поскольку критические размеры полупроводниковых компонентов, как логических транзисторов, так и памяти, составляют менее 22 нм. Этот переход к режиму далеко-субнанометрового диапазона позволил получить множество новых приложений для информационных и коммуникационных технологий. Однако общие размеры практических систем электронных информационных и коммуникационных технологий, в которых используются эти наноразмерные компоненты, остаются относительно большими, обычно порядка сантиметров или больше. Ещё в 1959 году Ричард Фейнман сделал дальновидную презентацию, в которой он предположил возможность создания компьютеров с «субмикроскопическими» размерами. Хотя прогресс полупроводниковой технологии был выдающимся, субмикроскопические и даже микроскопические компьютеры остаются вне нашего понимания. Более того, неизвестно, какой минимальный размер системы может быть достигнут с помощью существующих или проектируемых полупроводниковых технологий.

Компоненты наноэлектроники часто имеют размер всего несколько нанометров. Однако чем меньше становятся электронные компоненты наноэлектронных приборов и устройств, тем сложнее их производить. Наноэлектроника охватывает разнообразный набор устройств и материалов, с общей характеристикой, заключающейся в том, что они настолько малы, что физические эффекты изменяют свойства материалов в наномасштабе — межатомные взаимодействия и квантовомеханические свойства играют значительную роль в работе этих устройств. На наномасштабе новые явления имеют приоритет над теми, что господствуют в макромире. Квантовые эффекты, такие как туннелирование и атомистический беспорядок, доминируют в характеристиках этих наноразмерных устройств.

Отрасль наноэлектроники повлияет на современное общество в широком спектре приложений: вычисления, связь, здравоохранение, безопасность и оборона, а также мониторинг окружающей среды. Согласно прогнозам, в 2024 году технологический узел для металлооксидных полупроводниковых полевых транзисторов будет составлять 8 нм (в настоящее время 28 нм), а частота отсечки будет порядка 1 ТГц (в настоящее время 0.35 ТГц).

Дифракция — это фундаментальное физическое явление, возникающее при периодическом размещении источников рассеивающих волн. Например, когда рентгеновские лучи падают на кристаллы поваренной соли, дифракция возникает из-за периодической структуры атомов хлора и натрия. Последние достижения в области нанотехнологий позволили искусственно контролировать точки рассеяния даже в видимых длинах волн. Эти искусственные структуры называются фотонными кристаллами и связаны со многими интересными явлениями. Дисперсионные соотношения между волновым вектором и частотой называются полосными структурами. Подобно зонным структурам электронов и дырок в кристаллах, фотонные зоны для дисперсии определяют направление распространения световых волн за счёт дифракции периодических структур. В статье [1] представлена технологию полос, которая позволяет многократно повторять полосы в произвольных волновых векторах с помощью голографической модуляции. Уже реализован узорчатый источник света под названием «iPMSEL» как типичное применение голографической фотонной полосы. IPMSEL был реализован путем объединения фотонно-кристаллических лазеров с поверхностным излучением и голографической техники. Он может излучать произвольные множественные диаграммы направленности и даже фотографические изображения из крошечного полупроводникового чипа без каких-либо оптических компонентов. В статье [1] изучается iPMSEL с точки зрения механизма репликации и работы фотонной полосы. Хотя эта работа основана на

фотонике, полученные результаты также могут быть применены к другим областям физики, связанным с дифракцией. Полагаем, что работа предоставляет полезные методы в отношении периодических структур во всех диапазонах масштабов.

В статье [2] теоретически поясняется, что топологические моды кольцевого резонатора, распространяющиеся вдоль границы раздела между двумя различными по топологии фотонными кристаллами сотового типа, могут быть использованы для достижения стабильной одномодовой генерации с максимальной интенсивностью, на порядок величины большей, чем у аналога в моде шепчущей галереи. В частности, показано, что топологические моды кольцевого резонатора, расположенные в центре объемной запрещенной зоны, максимально выигрывают от профиля усиления, поскольку они наиболее концентрированы и однородны вдоль границы раздела, и что, унаследовав от дираковской дисперсии состояний топологической границы раздела, они разделены по частоте друг от друга и от других фотонных мод, что способствует собственно одномодовой генерации. Топологическая мода кольцевого резонатора, движущаяся в определенном направлении с желаемым орбитальным угловым моментом, может быть стимулирована выборочно путём инжекции пучка с круговой поляризацией. По этой схеме можно создать топологический лазер с линейными размерами в десятки микрометров с помощью передовых полупроводниковых нанотехнологий, который генерирует киральные лазерные лучи, идеально подходящие для новых фотонных функций.

Квантовому поведению поверхностных плазмонов уделялось большое внимание благодаря развитию изысканных нанотехнологий и разнообразных приложений. Сообщалось о синем смещении, красном смещении и несмещении локализованных поверхностных плазмонных резонансов, когда размер частицы уменьшается и входит в режим квантового размера, но лежащий в основе физический механизм, вызывающий эти противоречивые зависимости от размера, не ясен. В статье [3] предложена улучшенная полуклассическая модель для модификации диэлектрической функции металлических наносфер путём комбинирования собственных квантованных электронных переходов и инжекции или экстракции поверхностных электронов для исследования плазмонного сдвига и зависимости размера локализованного поверхностного плазмонного резонанса заряженных наночастиц золота. Экспериментально наблюдается, что немонотонный синий сдвиг локализованных поверхностных плазмонных резонансов с размером для наночастиц золота превращается в приблизительно монотонный голубой сдвиг за счёт увеличения концентрации доноров электронов в восстанавливающем растворе, а также он может быть преобразован в приблизительно монотонное красное смещение после пассивации поверхности с помощью молекулы лиганда. Кроме того, продемонстрировано, что контролируемое синее смещение и красное смещение для электронного и дырочного плазмонов в наночастицах ядро-оболочка путём инжекции электронов. Экспериментальные наблюдения и теоретические расчёты проясняют противоречивые зависимости локализованного поверхностного плазмонного резонанса от размера, о которых сообщается в литературе, раскрывают критическую роль инжекции или экстракции поверхностных электронов в преобразовании между различными размерными зависимостями локализованных поверхностных плазмонных резонансов и полезны для понимания природы поверхностных плазмонов в квантово-размерном режиме.

Одна из фундаментальных целей нанотехнологии — использовать селективные и направленные взаимодействия между молекулами для создания частиц, которые самоорганизуются в желаемые структуры, от капсидов до нанокластеров и до полностью сформированных кристаллов с целевыми свойствами (например, оптическими, механическими). В статье [4] предлагается общая схема, которая преобразует обратную задачу самосборки коллоидных кристаллов в задачу булевой выполнимости, решения которой могут быть найдены численно. Учитывая эталонную структуру и желаемое количество

компонентов, подход создаёт конструкции, для которых целевая структура является минимумом энергии, а также позволяет нам исключить решения, соответствующие конкурирующим структурам. Продемонстрирована эффективность подхода, создавая модельные частицы, которые спонтанно зарождаются в ключевых структурах, таких как кубический алмаз, пирохлор и клатратные решетки.

Нанотехнологии не только предоставили нам возможность разработки квантовых машин, но и неканонические источники энергии, способные ими управлять. В статье [5] сосредотачиваются на изучении производительности квантовых машин, управляемых произвольными комбинациями равновесных резервуаров и формой спроектированных резервуаров, состоящих из невзаимодействующих частиц, но функции распределения которых нетепловые. Предоставлены выражения для расчёта максимальной эффективности этих машин, не зная, как на самом деле были созданы неравновесные резервуары. Формулы требуют вычисления величины, которую называем энтропийным током. Проиллюстрирована методология с помощью решаемой игрушечной модели, в которой тепло «спонтанно» течёт против температурного градиента.

Полностью диэлектрическая резонансная нанофотоника лежит в основе современной оптики и нанотехнологий благодаря уникальным возможностям управления рассеянием света от диэлектрических наночастиц и метаповерхностей с высоким показателем преломления. Одна из важных концепций диэлектрической резонансной нанофотоники Ми связана с эффектом Керкера, который вызывает однонаправленное рассеяние света от наноантенн и метаповерхностей Гюйгенса. В статье [6] предлагается и экспериментально демонстрируется новый эффект, проявляющийся в почти полном одновременном подавлении как прямого, так и обратного рассеянных полей. Этот эффект определяется резонансом Фано электрического диполя и нерезонансных квадруполей, обеспечивая необходимые фазы и амплитуды рассеянных полей для достижения поперечного рассеяния. Распространяется эта концепция на диэлектрические метаповерхности, которые демонстрируют нулевое отражение с поперечным рассеянием и усилением сильного поля для резонансной фильтрации света, нелинейных эффектов и зондирования.

Рассеяние света субволновыми частицами тесно связано с резонансами Ми и оптически индуцированным мультиполярным откликом [7, 8]. Сосуществование и взаимодействие электрических и магнитных дипольных мод позволяет достичь либо конструктивной, либо деструктивной интерференции, приводящей к замечательному разнообразию диаграмм рассеяния субволновых диэлектрических частиц [9, 10]. В частности, сильное асимметричное рассеяние вперёд-назад (часто называемое эффектом Керкера) достигается в результате интерференции электрических и магнитных дипольных мод [11–15] или квадрупольные моды с соответствующими фазовыми соотношениями [10, 16, 17]. Эффект Керкера также представляет большой интерес для направленности ближнего поля диполей Гюйгенса [18], и он стимулирует физику высокоэффективных пассивных и активных диэлектрических метаповерхностей и метаустройств, резонансных Ми [19–23].

Металлическая наночастица, связанная с квантовым излучателем, представляет собой универсальную композитную наноструктуру с уникальными химическими и физическими свойствами, которая интенсивно изучается благодаря широкому спектру многообещающих применений в нанонауке и нанотехнологиях. При накачке до более высокого уровня усиления металлическая наночастица, связанная с композитной наноструктурой с квантовым излучателем, действует как наноплазмонный аналог обычного лазера, который способен работать на субволновых длинах волн. Теория плазмонных лазеров до сих пор разрабатывалась на основе локального оптического отклика металлической наночастицы без учёта наноразмерных эффектов ее свободных электронов. В статье [24] проведён всесторонний квантовомеханический анализ сложной металличе-

ской наночастицы, связанной с композитной наноструктурой с квантовым излучателем, улавливая неклассические эффекты, зависящие от размера, через нелокальный оптический отклик металлической наночастицы. Исследование показывает, что нелокальная поправка вносит значительные отклонения в плазмонную статистику гибридной частицы, предполагаемую локальными расчетами, которые становятся более заметными при увеличении количества квантовых излучателей, связанных с металлической наночастицей. Кроме того, для типичных значений параметров материала, используемых в литературе, наблюдали возникновение эффектов гашения при более низких скоростях накачки, чем предполагалось в формализме местного отклика. По сути, нелокально оцениваемая плазмонная статистика металлических наночастиц, связанных с композитными наноструктурами с квантовым излучателем, требует согласованного взаимодействия ещё большего числа квантовых излучателей, чтобы компенсировать ухудшение когерентности и поддерживать генерацию.

Способность гетероструктур из графена и полимера поглощать электромагнитное излучение ГГц недавно была подтверждена как теоретически, так и экспериментально [25, 26]. Было показано, что максимальное поглощение зависит исключительно от показателей преломления падающей и выходящей среды, если выполняются условия согласования импеданса. В статье [27] аналитические модели и численное моделирование выполняются как для полубесконечной, так и для конечной плиты-основы. Продемонстрировано, что только три слоя графена, разделенные диэлектрической прокладкой и эпсилон квазинулевым метаматериалом в качестве выходной среды, обеспечивают идеальное поглощение при нормальном падении. Использование эпсилон-метаматериала, близкого к нулю, без потерь предотвращает прохождение излучений через устройство из-за бесконечного импеданса и заставляет их полностью поглощаться диссипативной средой (графеном). Доказано, что устройство устойчиво к угловому падению до 45 градусов для полубесконечного эпсилон-метаматериала, близкого к нулю. Предлагаемая стратегия универсальна и может применяться к любым двумерным диссипативным материалам, лежащим на эпсилон квазинулевом метаматериале. Предлагаемый поглотитель не зависит от поверхностного рисунка или текстурирования и, следовательно, более привлекателен для применения в устройствах.

В статье [28] описаны условия квазинулевой диэлектрической прогницаемости, которые улучшают сверхпроводящие свойства композитного метаматериала на основе случайного смешивания сверхпроводниковых и сегнетоэлектрических наночастиц. В статье [28] анализируются несколько других многообещающих экспериментальных геометрий, которые могут значительно усилить спаривание электронов в сверхпроводнике из метаматериалов. Предлагаемые геометрические формы могут быть изготовлены на современном уровне развития нанотехнологий. Они позволяют настраивать как частотную, так и пространственную дисперсию эффективной функции диэлектрического отклика метаматериала, что позволяет оптимизировать свойства сверхпроводника метаматериала.

В статье [29] показано, как вызвать направленное движение наноразмеров с помощью некоторых внутренних механизмов, относящихся к наносистеме, остаётся проблемой в нанотехнологиях. В статье [29] показано с помощью моделирования молекулярной динамики, что существует фундаментальная движущая сила для того, чтобы наноразмерный объект перемещался из области более низкой жёсткости в область более высокой жёсткости на подложке. Такое направленное движение в наномасштабе вызвано разницей в эффективной потенциальной энергии Ван-дер-Ваальса из-за изменения жесткости подложки; то есть при прочих равных условиях наноразмерный объект на более жёсткой подложке имеет более низкую потенциальную энергию Ван-дер-Ваальса. Этот фундаментальный закон направленного движения в наномасштабе может приве-

сти к появлению многообещающих путей для срабатывания и преобразования энергии в наномасштабе.

Исследование и манипулирование электронными состояниями в низкоразмерных системах имеют большое значение в фундаментальных и практических аспектах наноматериалов и нанотехнологий. В статье [30] продемонстрировано, что внедрение вакансионных дефектов в одноатомные индиевые проволоки на кремнии может стабилизировать электронно-фазово-разделенные основные состояния, в которых изолирующие и металлические фазы сосуществуют. Кроме того, соотношение площадей двух фаз в фазово-разделенных состояниях можно обратимо настраивать с помощью электрического поля или легирования заряда, и такие настраиваемые параметры могут быть количественно зафиксированы с помощью моделирования и симуляций на основе первых принципов.

Атомистические расчёты сильной связи показывают, что двумерные топологические изоляторы могут быть получены с использованием нанотехнологий Ge или Ge/Si [31]. Сильное квантовое ограничение используется для открытия энергетических щелей в валентной зоне искусственного графена из Ge. Эти зазоры топологически нетривиальны из-за комбинации сотовой наногеометрии и спин-орбитальной связи. Ширина зазора выше 10 мэВ может быть получена с использованием реалистичных структур. Обладая небольшими эффективными массами, сильной спин-орбитальной связью и высокой совместимостью с процессами микроэлектроники, Ge является отличной подложкой для изготовления устройств спинтроники на основе состояний топологического изолятора.

Квантовый излучатель, связанный с наномеханическим осциллятором, представляет собой гибридную систему, в которой макроскопическая степень свободы связана с чисто квантовой системой. Недавний прогресс в области нанотехнологий привел к реализации таких устройств путём встраивания отдельных искусственных атомов, таких как квантовые точки или сверхпроводящие кубиты, в вибрирующие провода или мембраны, что открыло новые перспективы для квантовых информационных технологий и для исследования границы между квантами и классикой. В статье [32] показано, что квантовый излучатель можно превратить в поразительно эффективный управляемый светом источник механической энергии, используя конструктивную интерференцию классических фононных полей в механическом осцилляторе. Показано, что этот механизм может быть использован для проведения неразрушающего однократного измерения оптически активного квантового бита с низким уровнем фона.

В статье [33] численно изучаются рассеяние и поглощение света в самоподобных агрегатах диэлектрических наночастиц, возникающих в результате моделирования баллистического осаждения на поверхность, начиная с одной затравочной частицы. Полученная структура имеет сложную древовидную форму, предназначенную для имитации морфологических свойств строительных блоков настоящих наноструктурированных тонких плёнок, полученных с помощью процессов тонко контролируемого физического осаждения, используемых в нанотехнологиях. Связь сечений рассеяния и поглощения с морфологией исследуется в рамках вычислительной схемы, которая тщательно учитывает как многократное рассеяние, так и эффекты ближнего поля. Численные результаты сравниваются с ранее существовавшей аналитической обработкой ограниченного однократного рассеяния света во фрактальных агрегатах малых диэлектрических частиц.

Создание квантового транзистора, состоящего из молекул или квантовых точек, было одной из самых амбициозных задач в области нанотехнологий. Несмотря на то, что был достигнут значительный прогресс, возможность управлять объектами нанометрового масштаба и управлять ими, а также связывать их для достижения масштабируемости остается чрезвычайно сложной задачей. Большинство экспериментов касается

отдельной квантовой точки или молекулы, и они проводятся при сверхнизкой температуре, чтобы избежать декогеренции и туннелирования. В статье [34] предлагается использовать канонические преобразования для разработки квантовых устройств, которые защищены симметрией и, следовательно, могут работать при высоких температурах. Проиллюстрируем идею примерами архитектур на квантовых транзисторах, которые можно подключать как последовательно, так и параллельно.

Фундаментальное понимание взаимодействия клетки и наноматериала имеет важное значение для наномедицины и безопасного применения нанотехнологий. В статье [35] исследуется адгезивное обертывание мягких эластичных пузырьков липидной мембраной. В статье [35] показано, что существует максимум пять различных фаз упаковки, основанных на стабильности состояния полной упаковки, частичной упаковки и отсутствия состояний упаковки. Фазы обертывания зависят от размера везикул, энергии адгезии, поверхностного натяжения мембраны и соотношения жесткости при изгибе между везикулами и мембраной. Эти результаты представляют непосредственный интерес для изучения везикулярного транспорта и эндоцитоза или фагоцитоза эластичных частиц в клетки.

Подход с подавлением рассеяния недавно был предложен в качестве многообещающего способа создания плащ-невидимок. Однако снижение наблюдаемости объекта — лишь одно из возможных применений этой техники. В статье [36] исследуется возможность уменьшить оптические силы, действующие на данную наночастицу, путём покрытия её правильно разработанной плазмонной маскировкой. Фактически, показано, что условия, аналогичные тем, которые используются для того, чтобы сделать сферические и цилиндрические наночастицы невидимыми для электромагнитного поля с помощью метода компенсации рассеяния, могут быть непосредственно применены также для минимизации как градиентных, так и рассеивающих оптических сил, оказываемых освещающим излучением на поверхность. такие же покрытые наночастицы. Эти результаты затем подтверждаются с помощью полноволнового моделирования, должным образом учитывающего как дисперсию, так и потери плазмонных материалов, используемых для создания маскировочных покрытий. Расширяем также рассуждения на случай оптических моментов, действующих на сфероидальные и цилиндрические рэлеевские частицы, определяя условия для получения стабильных положений равновесия. Это исследование приводит к аномальному результату, заключающемуся в том, что обычные нестабильные положения равновесия непокрытых частиц могут привести к стабильным положениям при правильном проектировании покрытия для частиц. Наконец, чтобы применить предложенные теоретические рассуждения к более сложным случаям, выводим условия минимизации оптических сил, действующих на маскированную частицу Рэлея, помещенную над диэлектрическим полупространством. Эти результаты могут найти интересные приложения в различных областях нанотехнологии.

Оптические наноцепи могут проложить путь к революционным достижениям в наноразмерных коммуникациях. В статье [37] представлена концепция оптической наносхемы, состоящей из слоистой структуры из метаматериала с низкой эффективной диэлектрической проницаемостью, по которой могут быть вырезаны определенные трассы, которые направляют ток оптического смещения, позволяя оптическую «локальную связь» между «нелокальной» удалённой наносистемой. элементы. Это может обеспечить «печатные» наноцепи, реализуя полностью оптическую нанопечатную плату, на которой могут быть нанесены наноимпринты определенные канавки в рамках современной нанотехнологии.

Описание результатов разработки элементов дистанционного курса по факультативному курсу “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE

В настоящее время интенсивно различные системы дистанционного обучения и дистанционной поддержки обучения. В связи с этим становится актуальной задача разработки информационного обеспечения и сопровождения изучения электронного курса, созданного в системе дистанционного обучения.

Объектом исследования в части разработки электронного образовательного ресурса является дистанционный курс «Нанотехнологии в современном мире». Предметом исследования в части разработки электронного образовательного ресурса является процесс создания дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире». Дистанционный курс «Нанотехнологии в современном мире» в системе управления обучением MOODLE позволяет организованно хранить теоретические материалы, практические задания, задачи и вопросы в области междисциплинарных исследований по физике и нанотехнологии, организовать систематическое изучение теоретических материалов и практических заданий дистанционного курса. При создании дистанционного курсы были использованы теоретические материалы междисциплинарной области исследований на стыке физики и нанотехнологии.

Опишем результаты разработки дистанционного курса по факультативному курсу “Нанотехнологии в современном мире”. На первом этапе разработки дистанционного курса по факультативному курсу “Нанотехнологии в современном мире” выполнен анализ программ изучения дисциплин по физическим основам нанотехнологии. Выполнен анализ программ по физическим основам нанотехнологии, что позволило выделить максимальный объём материала, необходимого для создания и наполнения дистанционного курса по факультативному курсу “Нанотехнологии в современном мире”. Первоначально выбор для создания дистанционного курса по факультативному курсу “Нанотехнологии в современном мире” был сделан в пользу инструментальных возможностей бесплатной платформы MOODLE по причине изначальной ориентации этого инструмента на общение в процессе обучения физическим основам нанотехнологии.

На втором этапе разработки дистанционного курса по факультативному курсу “Нанотехнологии в современном мире” выполнен подбор и анализ теоретического материала в рамках выбранного раздела и тем. Проведено всестороннее сравнение различных подходов к изложению теоретического материала по физическим основам нанотехнологии.

На третьем этапе разработки дистанционного курса по факультативному курсу “Нанотехнологии в современном мире” выполнено создание структуры дистанционного курса по факультативному курсу “Нанотехнологии в современном мире”. Изначально был выбран модульный принцип построения электронного курса в системе управления обучением MOODLE. Использование этого принципа позволяет открывать и закрывать модули от чтения или редактирования по мере необходимости изучения темы. Этот механизм, связанный с возможностью открывания и закрывания модулей, обеспечит ритмичное продвижение по курсу в процессе изучения факультативного курса “Нанотехнологии в современном мире”.

На четвёртом этапе разработки дистанционного курса по факультативному курсу “Нанотехнологии в современном мире” выполнено наполнение модулей теоретическим содержанием по оптике, различными заданиями и задачами по физическим основам нанотехнологии. Систематизация теории по физическим основам нанотехнологии позволила наполнить теоретическими материалами дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире».

На пятом этапе разработки дистанционного курса по факультативному курсу “Нанотехнологии в современном мире” будет необходимо записать пользователей на курс и организовать работу с журналом в системе MOODLE.

Технология создания дистанционного курса по факультативному курсу “Нанотехнологии в современном мире” является достаточно трудоёмкой и включает такие этапы разработки, как определение целей и задач разработки, разработка структуры дистанционного курса по физическим основам нанотехнологии, разработка содержания по модулям и темам электронного ресурса, подготовка сценариев работы с отдельными элементами дистанционного курса, программирование, апробация, корректировка содержания электронного курса по результатам апробации, подготовка методического пособия пользователя.

Выполним описание процесса разработки элементов разработанного дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE. Для внедрения современных представлений о физических свойствах и технологии получения наноструктур предполагается разработать курс “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE. Кроме того, рассмотрим особенности создания основных элементов дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE с системой задач и заданий в тестовой форме. Процесс проектирования модульной структуры курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE, размещённой на сайте ФГБОУ ВО "УлГПУ им. И. Н. Ульянова имеет целый ряд преимуществ таких, как возможность выбора темпа и индивидуальной траектории изучения учебной дисциплины.

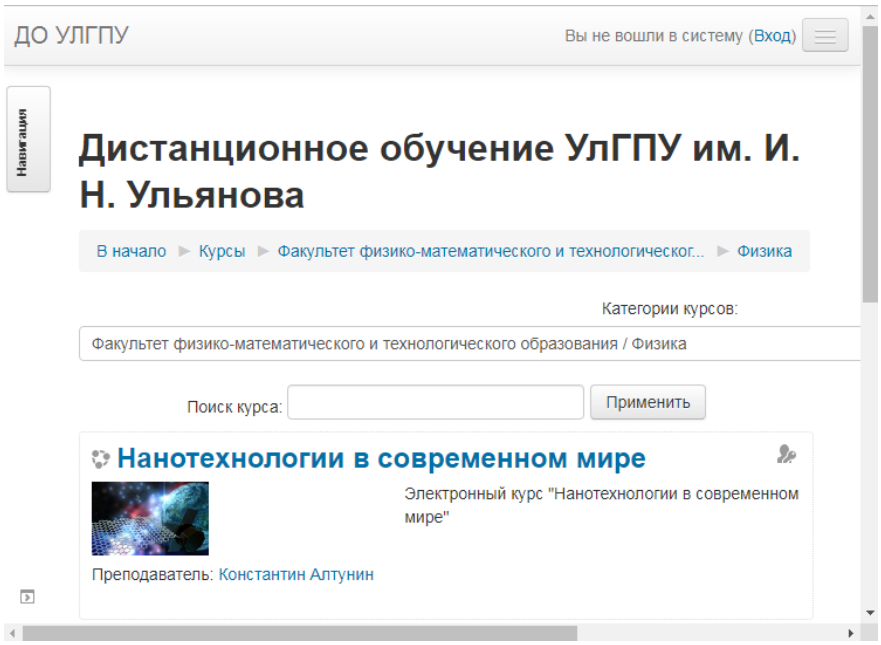


Рис. 1. Изображение входной страницы дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 1 представлено изображение входной страницы дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире”, созданного в системе управления обучением MOODLE.

В работе для демонстрации возможностей системы MOODLE был создан дистанционный курс по нанотехнологиям в системе дистанционного обучения Ульяновского государственного педагогического университета имени И. Н. Ульянова. Вид структуры модулей дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире” показан на рис.

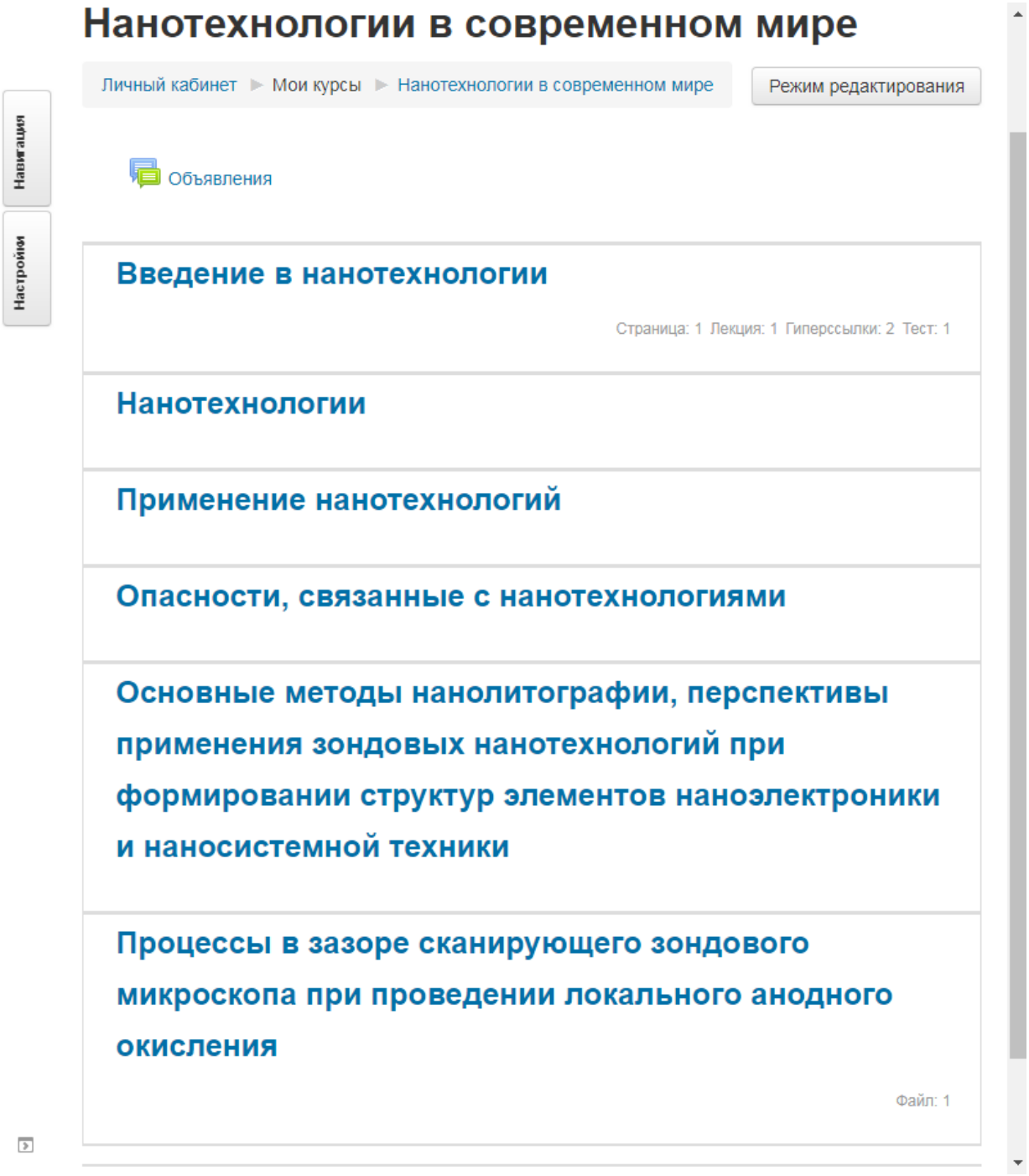


Рис. 2. Изображение структуры модулей факультативного курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE.

2-5. На рис. 2 представлено изображение структуры модулей факультативного курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 представлено изображение элементов первой темы курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE.

Структура курса “Нанотехнологии в современном мире” состоит из 6 модулей. Каждый из модулей является логическим продолжением предыдущего модуля по тематике. Каждый модуль содержит элементы для контроля знаний по учебной дисциплине “Нанотехнологии в современном мире”.

Приведём описание разработки банка вопросов и заданий курса “Нанотехнологии в современном мире”. Любой учебный курс, даже полностью дистанционный курс, не

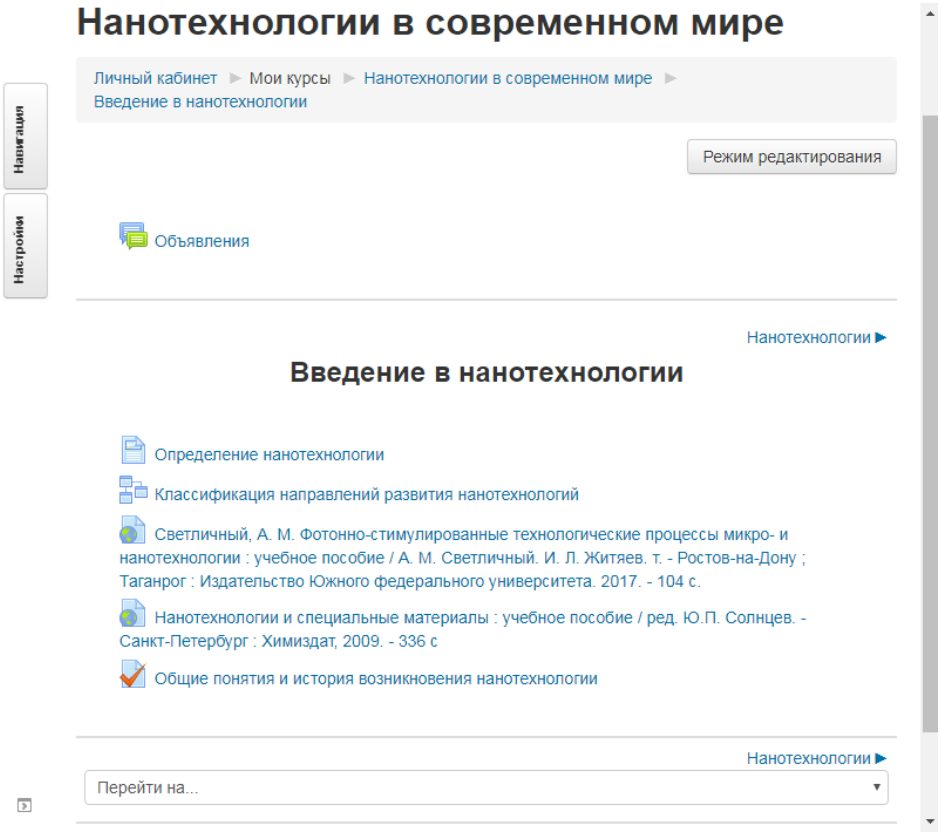


Рис. 3. Изображение элементов первой темы дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE.

мыслим без планомерного и систематического контроля теоретических знаний. В составе электронного курса “Нанотехнологии в современном мире”, разработанного на платформе MOODLE, создан банк вопросов для контроля репродуктивного уровня усвоения теоретических знаний по физическим основам нанотехнологий. Каждый вопрос по физическим основам нанотехнологии имеет номер и название. Этот принцип нумерации вопросов облегчает добавлению вопросов по физическим основам нанотехнологии из банка вопросов в тематический тест в составе конкретной темы дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире”.

Наглядность в электронном образовательном ресурсе “Нанотехнологии в современном мире” значительно выше, чем в печатном учебнике. Причём достигается высокая наглядность и оперативность в выставлении и получении оценок за выполненные задания и проделанные работы в электронном курсе “Нанотехнологии в современном мире”. Наглядность обеспечивается использованием при создании электронных образовательных ресурсов различных современных мультимедийных технологий таких, как гиперссылок, видеосюжетов, анимации, звукового сопровождения и т.п.

Рассмотрим описание разработки банка вопросов в составе дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире”, созданного в системе управления обучением MOODLE. Банк вопросов дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире” включает в себя разноуровневые вопросы разных типов по оптическим свойствам наноструктур.

Элементы контроля включают ряд тестов, набор задач и заданий в виде рефератов по темам курса. В составе дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE создан банк вопросов для текущего контроля знаний. На рис. 4 представлен первый вопрос из теста 1 по первой теме дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире”, который являются вопро-

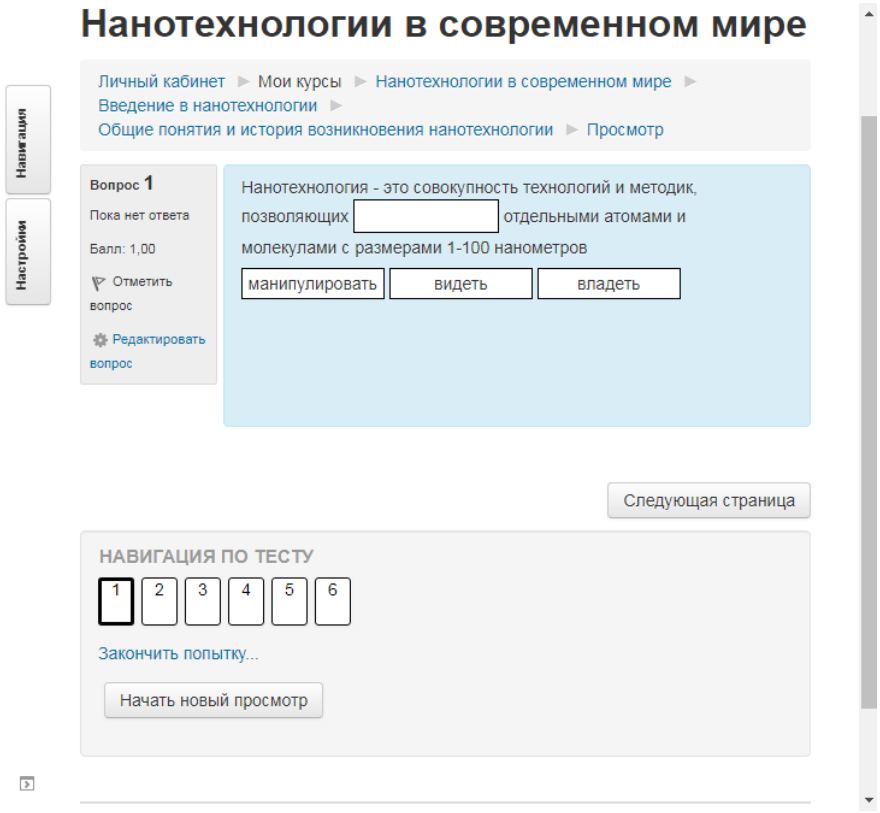


Рис. 4. Первый вопрос из теста 1 по первой теме дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE.

сом с выбором одного правильно ответа, использующаяся для осуществления контроля за степенью теоретических знаний на репродуктивном уровне.

На рис. 5 представлен второй вопрос из теста 1 по первой теме дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 6 представлен третий вопрос из теста 1 по первой теме дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире”.

На рис. 7 представлен четвёртый вопрос из теста 1 по первой теме дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире”.

На рис. 8 представлен пятый вопрос из теста 1 по первой теме дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире”.

На рис. 9 представлен шестой вопрос из теста 1 по первой теме дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире”.

Использование дистанционного курса по факультативному курсу “Нанотехнологии в современном мире” способствует интенсификации учебно-воспитательного процесса, более осмысленному изучению материала, приобретению навыков самоорганизации, превращению систематических знаний в системные, помогает развитию познавательной деятельности обучаемых и интереса к физическим основам нанотехнологии. У обучаемых, прошедших обучение с использованием обучающей программы происходит не только существенное развитие логического мышления, но и значительно повышается уровень рефлексивных действий с материалом, изучаемым на занятиях.

В данной части работы рассмотрено научно-методическое сопровождение процесса разработки факультативного курса в виде дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире». Дистанционный курс «Нанотехнологии в современном мире» разработан в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

Рис. 5. Второй вопрос из теста 1 по первой теме дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE.

В составе дистанционного курса в качестве факультативного курса «Нанотехнологии в современном мире» представлены элементы для проверки теоретических знаний по физическим основам нанотехнологии, позволяющая организовать автоматизированную проверку знаний по физическим основам курса. Разработаны элементы модулей дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире» позволяющие контролировать усвоение знаний по физике от репродуктивного до творческого уровня.

Заключение

Рассмотрено применение теоретических материалов по описанию оптических свойств наноструктурных материалов в дистанционном курсе по нанотехнологиям в современном мире. В связи с возрастающей информатизацией образования идёт внедрение электронных курсов, онлайн-курсов, дистанционных курсов во всех предметных областях, включая междисциплинарную область исследований на стыке физики и нанотехнологии. Поэтому разработка дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире» представляет практическую значимость для образовательного процесса по физике с элементами нанотехнологии.

Дистанционный курс «Нанотехнологии в современном мире» может быть использован при проведении факультативных курсов в области междисциплинарных исследований по физике и физическим основам нанотехнологии. Систематизация теории по физическим основам нанотехнологии позволила наполнить теоретическими материалами дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире». Разработаны элементы модулей дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире», позволяющие контролировать усвоение знаний по физике от репродуктивного до творческого уровня.

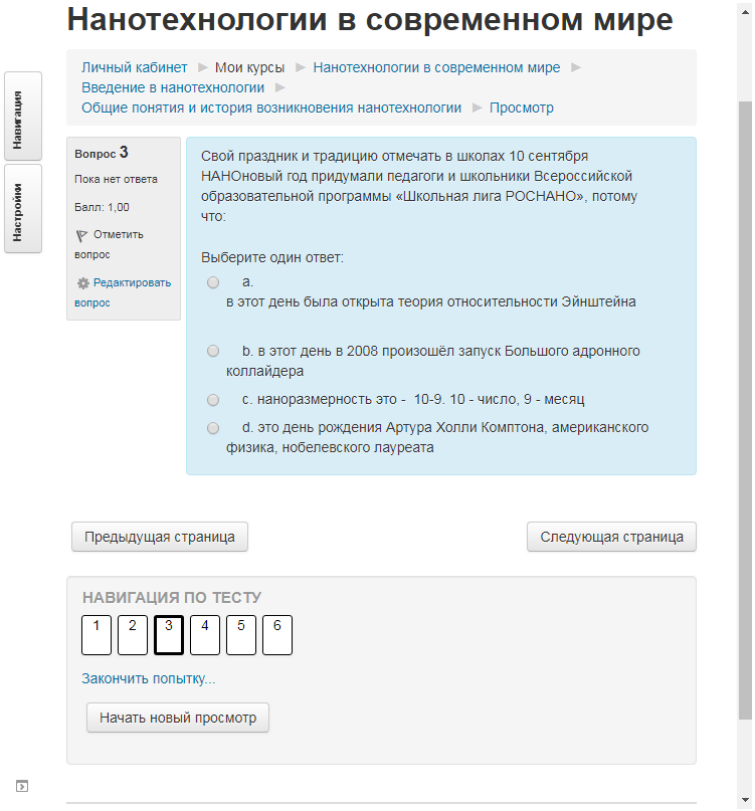


Рис. 6. Третий вопрос из теста 1 по первой теме дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE.

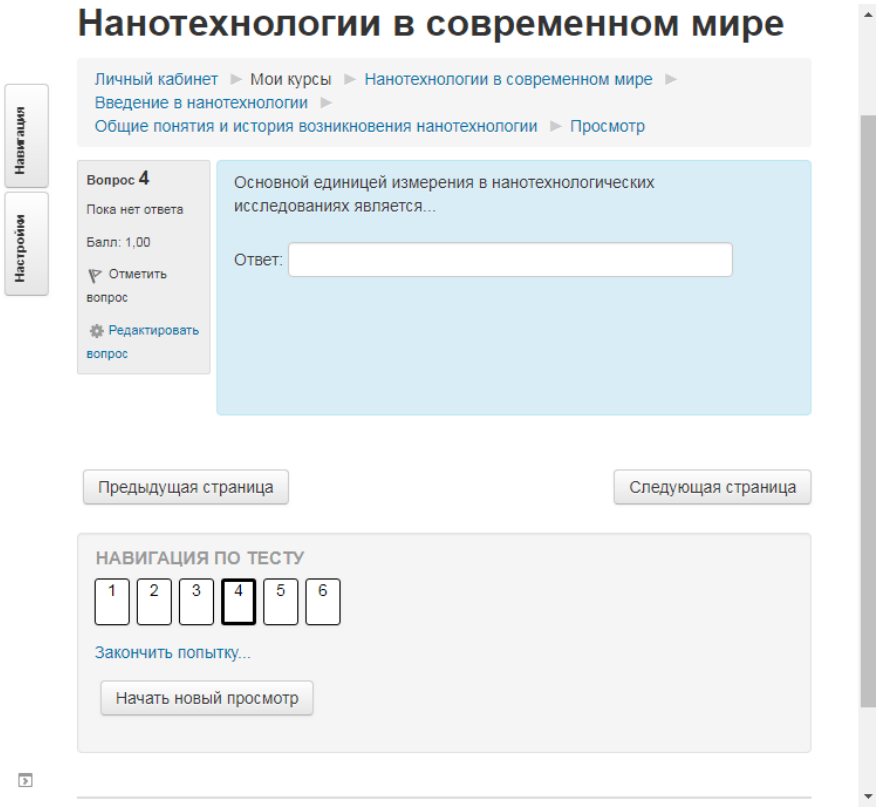


Рис. 7. Четвёртый вопрос из теста 1 по первой теме дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE.

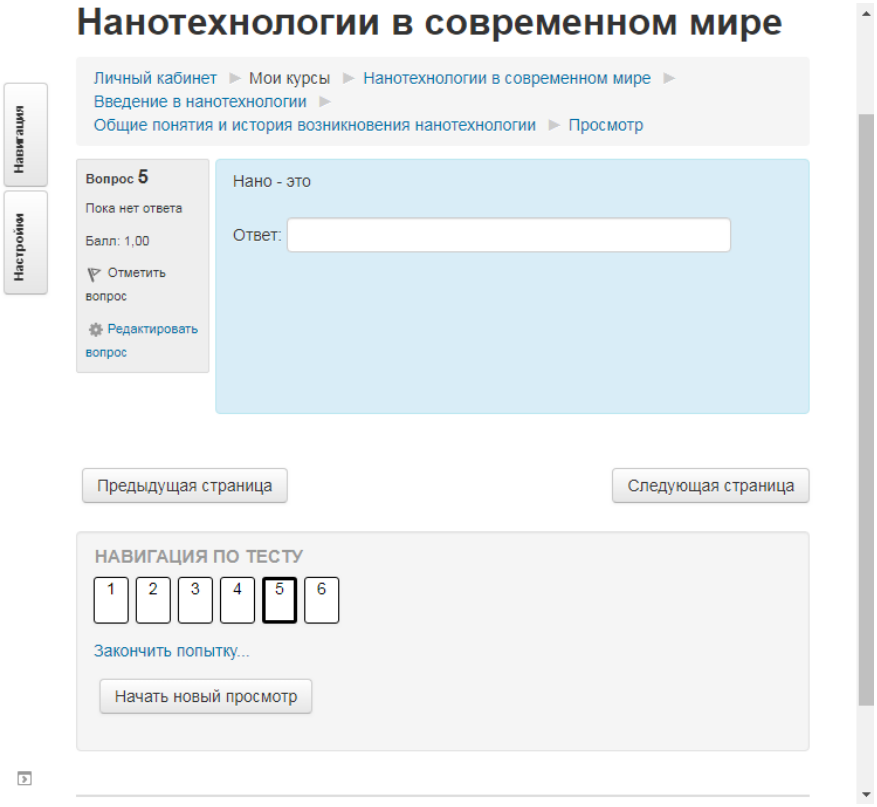


Рис. 8. Пятый вопрос из теста 1 по первой теме дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE.

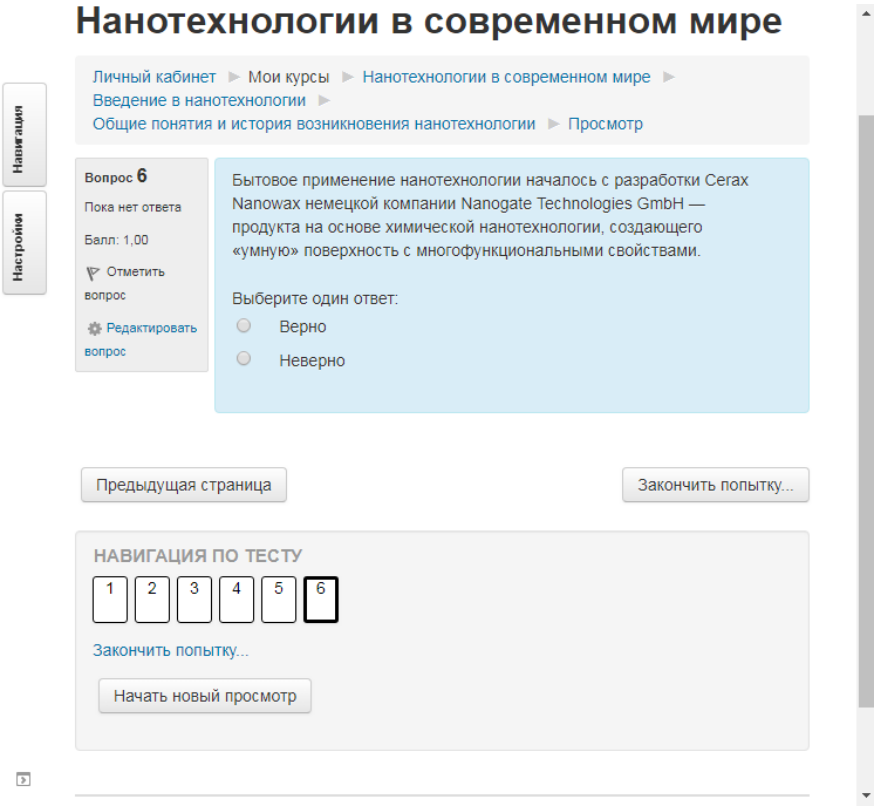


Рис. 9. Шестой вопрос из теста 1 по первой теме дистанционного курса “Нанотехнологии в современном мире” в системе управления обучением MOODLE.

В составе дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире» представлены элементы для проверки теоретических знаний по физическим основам нанотехнологии, позволяющая организовать автоматизированную проверку знаний по физическим основам курса. Разработаны элементы модулей дистанционного курса «Нанотехнологии в современном мире» позволяющие контролировать усвоение знаний по физике от репродуктивного до творческого уровня.

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

Использование дистанционного курса в качестве факультативного курса “Нанотехнологии в современном мире” способствует повышению эффективности самостоятельной работы, обеспечению визуализации процесса обучения, повышению эффективности управления обучением с использованием возможностей системы MOODLE.

Список использованных источников

1. Replication of band structure in an arbitrary wave vector by holographic modulation / Yoshitaka Kurosaka [et al.] // Physical Review B. — 2021. — jun. — Vol. 103, no. 24. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.245310.

2. Sun Xiao-Chen, Hu Xiao. Topological ring-cavity laser formed by honeycomb photonic crystals // Physical Review B. — 2021. — jun. — Vol. 103, no. 24. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.245305.

3. Tunable Size Dependence of Quantum Plasmon of Charged Gold Nanoparticles / Song Ma [et al.] // Physical Review Letters. — 2021. — apr. — Vol. 126, no. 17. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.126.173902.

4. Designing Patchy Interactions to Self-Assemble Arbitrary Structures / Flavio Romano [et al.] // Physical Review Letters. — 2020. — sep. — Vol. 125, no. 11. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.125.118003.

5. Deghi Sebastian E., Bustos-Marún Raúl A. Entropy current and efficiency of quantum machines driven by nonequilibrium incoherent reservoirs // Physical Review B. — 2020. — jul. — Vol. 102, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.102.045415.

6. Transverse Scattering and Generalized Kerker Effects in All-Dielectric Mie-Resonant Metaoptics / Hadi K. Shamkhi [et al.] // Physical Review Letters. — 2019. — may. — Vol. 122, no. 19. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.122.193905.

7. Kruk Sergey, Kivshar Yuri. Functional Meta-Optics and Nanophotonics Governed by Mie Resonances // ACS Photonics. — 2017. — nov. — Vol. 4, no. 11. — P. 2638–2649. — URL: https://doi.org/10.1021/acsphotonics.7b01038.

8. Kivshar Yuri. All-dielectric meta-optics and non-linear nanophotonics // National Science Review. — 2018. — jan. — Vol. 5, no. 2. — P. 144–158. — URL: https://doi.org/10.1093/nsr/nwy017.

9. Multipolar response of nonspherical silicon nanoparticles in the visible and near-infrared spectral ranges / Pavel D. Terekhov [et al.] // Physical Review B. — 2017. — jul. — Vol. 96, no. 3. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.96.035443.

10. Liu Wei, Kivshar Yuri S. Generalized Kerker effects in nanophotonics and meta-optics [Invited] // Optics Express. — 2018. — may. — Vol. 26, no. 10. — P. 13085. — URL: https://doi.org/10.1364/oe.26.013085.

11. Kerker M., Wang D.-S., Giles C. L. Electromagnetic scattering by magnetic spheres // Journal of the Optical Society of America. — 1983. — jun. — Vol. 73, no. 6. — P. 765. — URL: https://doi.org/10.1364/josa.73.000765.

12. Nieto-Vesperinas M., Gomez-Medina R., Saenz J. J. Angle-suppressed scattering and optical forces on submicrometer dielectric particles // Journal of the Optical Society of America A. — 2010. — dec. — Vol. 28, no. 1. — P. 54. — URL: https://doi.org/10.1364/josaa.28.000054.

13. Huygens optical elements and Yagi—Uda nanoantennas based on dielectric nanoparticles / A. E. Krasnok [et al.] // JETP Letters. — 2011. — dec. — Vol. 94, no. 8. — P. 593–598. — URL: https://doi.org/10.1134/s0021364011200070.

14. Resonant forward scattering of light by high-refractive-index dielectric nanoparticles with toroidal dipole contribution / Pavel D. Terekhov [et al.] // Optics Letters. — 2017. — feb. — Vol. 42, no. 4. — P. 835. — URL: https://doi.org/10.1364/ol.42.000835.

15. Kerker Effect in Ultrahigh-Field Magnetic Resonance Imaging / Marc Dubois [et al.] // Physical Review X. — 2018. — sep. — Vol. 8, no. 3. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevx.8.031083.

16. Ultra-directional forward scattering by individual core-shell nanoparticles / Wei Liu [et al.] // Optics Express. — 2014. — jun. — Vol. 22, no. 13. — P. 16178. — URL: https://doi.org/10.1364/oe.22.016178.

17. Pors Anders, Andersen Sebastian K. H., Bozhevolnyi Sergey I. Unidirectional scattering by nanoparticles near substrates: generalized Kerker conditions // Optics Express. — 2015. — oct. — Vol. 23, no. 22. — P. 28808. — URL: https://doi.org/10.1364/oe.23.028808.

18. Picardi Michela F., Zayats Anatoly V., Rodríguez-Fortuño Francisco J. Janus and Huygens Dipoles: Near-Field Directionality Beyond Spin-Momentum Locking // Physical Review Letters. — 2018. — mar. — Vol. 120, no. 11. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.120.117402.

19. High-Efficiency Dielectric Huygens' Surfaces / Manuel Decker [et al.] // Advanced Optical Materials. — 2015. — feb. — Vol. 3, no. 6. — P. 813–820. — URL: https://doi.org/10.1002/adom.201400584.

20. Invited Article: Broadband highly efficient dielectric metadevices for polarization control / Sergey Kruk [et al.] // APL Photonics. — 2016. — jun. — Vol. 1, no. 3. — P. 030801. — URL: https://doi.org/10.1063/1.4949007.

21. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces / Patrice Genevet [et al.] // Optica. — 2017. — jan. — Vol. 4, no. 1. — P. 139. — URL: https://doi.org/10.1364/optica.4.000139.

22. Staude Isabelle, Pertsch Thomas, Kivshar Yuri S. All-Dielectric Resonant Meta-Optics Lightens up // ACS Photonics. — 2019. — mar. — Vol. 6, no. 4. — P. 802–814. — URL: https://doi.org/10.1021/acsphotonics.8b01326.

23. Multipole analysis of dielectric metasurfaces composed of nonspherical nanoparticles and lattice invisibility effect / Pavel D. Terekhov [et al.] // Physical Review B. — 2019. — jan. — Vol. 99, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.99.045424.

24. Significance of the nonlocal optical response of metal nanoparticles in describing the operation of plasmonic lasers / Dasuni Lelwala Gamacharige [et al.] // Physical Review B. — 2019. — mar. — Vol. 99, no. 11. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.99.115405.

25. Flexible transparent graphene/polymer multilayers for efficient electromagnetic field absorption / K. Batrakov [et al.] // Scientific Reports. — 2014. — nov. — Vol. 4, no. 1. — URL: https://doi.org/10.1038/srep07191.

26. Robust electromagnetic absorption by graphene/polymer heterostructures / Michaël Lobet [et al.] // Nanotechnology. — 2015. — jun. — Vol. 26, no. 28. — P. 285702. — URL: https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/28/285702.

27. Perfect electromagnetic absorption using graphene and epsilon-near-zero metamaterials / Michael Lobet [et al.] // Physical Review B. — 2016. — jun. — Vol. 93, no. 23. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.93.235424.

28. Smolyaninov Igor I., Smolyaninova Vera N. Metamaterial superconductors // Physical Review B. — 2015. — mar. — Vol. 91, no. 9. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.91.094501.

29. Nanoscale Directional Motion towards Regions of Stiffness / Tienchong Chang [et al.] // Physical Review Letters. — 2015. — jan. — Vol. 114, no. 1. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.114.015504.

30. Stabilization and Manipulation of Electronically Phase-Separated Ground States in Defective Indium Atom Wires on Silicon / Hui Zhang [et al.] // Physical Review Letters. — 2014. — nov. — Vol. 113, no. 19. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.113.196802.

31. Delerue Christophe. Prediction of robust two-dimensional topological insulators based on Ge/Si nanotechnology // Physical Review B. — 2014. — aug. — Vol. 90, no. 7. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.90.075424.

32. Auffèves A., Richard M. Optical driving of macroscopic mechanical motion by a single two-level system // Physical Review A. — 2014. — aug. — Vol. 90, no. 2. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.90.023818.

33. Gerosa Matteo, Bottani Carlo Enrico. Multiple light scattering and near-field effects in a fractal treelike ensemble of dielectric nanoparticles // Physical Review B. — 2013. — may. — Vol. 87, no. 19. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.87.195312.

34. Büsser C. A., Feiguin A. E. Designing a symmetry-protected molecular device // Physical Review B. — 2012. — oct. — Vol. 86, no. 16. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.86.165410.

35. Yi Xin, Shi Xinghua, Gao Huajian. Cellular Uptake of Elastic Nanoparticles // Physical Review Letters. — 2011. — aug. — Vol. 107, no. 9. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.107.098101.

36. Tricarico Simone, Bilotti Filiberto, Vegni Lucio. Reduction of optical forces exerted on nanoparticles covered by scattering cancellation based plasmonic cloaks // Physical Review B. — 2010. — jul. — Vol. 82, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.82.045109.

37. Alù Andrea, Engheta Nader. All Optical Metamaterial Circuit Board at the Nanoscale // Physical Review Letters. — 2009. — sep. — Vol. 103, no. 14. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.103.143902.

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»

E-mail: kostya_altunin@mail.ru

ORCID iD 0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID I-5739-2014

SCOPUS ID 57201126207

Development of a distance course for the optional course "Nanotechnologies in the modern world"

K. K. Altunin

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted June 11, 2021
Resubmitted July 16, 2021
Published September 9, 2021

Abstract. The process of creating materials and elements of a distance course for the optional course "Nanotechnologies in the modern world" is considered. The systematization of the theory on the physical foundations of nanotechnology made it possible to fill the distant course "Nanotechnologies in the modern world" with theoretical materials. Elements of distance course modules "Nanotechnologies in the modern world" have been developed to control the assimilation of knowledge in physics from the reproductive to the creative level. The distance course "Nanotechnologies in the modern world" contains elements for testing theoretical knowledge on the physical foundations of nanotechnology, which allows organizing an automated test of knowledge on the physical foundations of the course. Elements of distance course modules "Nanotechnologies in the modern world" have been developed to control the assimilation of knowledge in physics from the reproductive to the creative level. Using the distance course as an optional course "Nanotechnologies in the modern world" helps to increase the efficiency of independent work, provide visualization of the learning process, improve the efficiency of learning management using the capabilities of the MOODLE system. Distance course "Nanotechnologies in the modern world" can be used for elective courses in the field of interdisciplinary research on physics and physical foundations of nanotechnology.

Keywords: physics, nanotechnology, distance course, course element, optional course, knowledge testing, knowledge assimilation, learning management system

PACS: 01.40.-d

References

1. Replication of band structure in an arbitrary wave vector by holographic modulation / Yoshitaka Kurosaka [et al.] // Physical Review B. — 2021. — jun. — Vol. 103, no. 24. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.245310.

2. Sun Xiao-Chen, Hu Xiao. Topological ring-cavity laser formed by honeycomb photonic crystals // Physical Review B. — 2021. — jun. — Vol. 103, no. 24. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.103.245305.

3. Tunable Size Dependence of Quantum Plasmon of Charged Gold Nanoparticles / Song Ma [et al.] // Physical Review Letters. — 2021. — apr. — Vol. 126, no. 17. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.126.173902.

4. Designing Patchy Interactions to Self-Assemble Arbitrary Structures / Flavio Romano [et al.] // Physical Review Letters. — 2020. — sep. — Vol. 125, no. 11. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.125.118003.

5. Deghi Sebastian E., Bustos-Marún Raúl A. Entropy current and efficiency of quantum machines driven by nonequilibrium incoherent reservoirs // Physical Review B. — 2020. — jul. — Vol. 102, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.102.045415.

6. Transverse Scattering and Generalized Kerker Effects in All-Dielectric Mie-Resonant Metaoptics / Hadi K. Shamkhi [et al.] // Physical Review Letters. — 2019. — may. — Vol. 122, no. 19. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.122.193905.

7. Kruk Sergey, Kivshar Yuri. Functional Meta-Optics and Nanophotonics Governed by Mie Resonances // ACS Photonics. — 2017. — nov. — Vol. 4, no. 11. — P. 2638–2649. — URL: https://doi.org/10.1021/acsphotonics.7b01038.

8. Kivshar Yuri. All-dielectric meta-optics and non-linear nanophotonics // National Science Review. — 2018. — jan. — Vol. 5, no. 2. — P. 144–158. — URL: https://doi.org/10.1093/nsr/nwy017.

9. Multipolar response of nonspherical silicon nanoparticles in the visible and near-infrared spectral ranges / Pavel D. Terekhov [et al.] // Physical Review B. — 2017. — jul. — Vol. 96, no. 3. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.96.035443.

10. Liu Wei, Kivshar Yuri S. Generalized Kerker effects in nanophotonics and meta-optics [Invited] // Optics Express. — 2018. — may. — Vol. 26, no. 10. — P. 13085. — URL: https://doi.org/10.1364/oe.26.013085.

11. Kerker M., Wang D.-S., Giles C. L. Electromagnetic scattering by magnetic spheres // Journal of the Optical Society of America. — 1983. — jun. — Vol. 73, no. 6. — P. 765. — URL: https://doi.org/10.1364/josa.73.000765.

12. Nieto-Vesperinas M., Gomez-Medina R., Saenz J. J. Angle-suppressed scattering and optical forces on submicrometer dielectric particles // Journal of the Optical Society of America A. — 2010. — dec. — Vol. 28, no. 1. — P. 54. — URL: https://doi.org/10.1364/josaa.28.000054.

13. Huygens optical elements and Yagi—Uda nanoantennas based on dielectric nanoparticles / A. E. Krasnok [et al.] // JETP Letters. — 2011. — dec. — Vol. 94, no. 8. — P. 593–598. — URL: https://doi.org/10.1134/s0021364011200070.

14. Resonant forward scattering of light by high-refractive-index dielectric nanoparticles with toroidal dipole contribution / Pavel D. Terekhov [et al.] // Optics Letters. — 2017. — feb. — Vol. 42, no. 4. — P. 835. — URL: https://doi.org/10.1364/ol.42.000835.

15. Kerker Effect in Ultrahigh-Field Magnetic Resonance Imaging / Marc Dubois [et al.] // Physical Review X. — 2018. — sep. — Vol. 8, no. 3. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevx.8.031083.

16. Ultra-directional forward scattering by individual core-shell nanoparticles / Wei Liu [et al.] // Optics Express. — 2014. — jun. — Vol. 22, no. 13. — P. 16178. — URL: https://doi.org/10.1364/oe.22.016178.

17. Pors Anders, Andersen Sebastian K. H., Bozhevolnyi Sergey I. Unidirectional scattering by nanoparticles near substrates: generalized Kerker conditions // Optics Express. — 2015. — oct. — Vol. 23, no. 22. — P. 28808. — URL: https://doi.org/10.1364/oe.23.028808.

18. Picardi Michela F., Zayats Anatoly V., Rodríguez-Fortuño Francisco J. Janus and Huygens Dipoles: Near-Field Directionality Beyond Spin-Momentum Locking // Physical Review Letters. — 2018. — mar. — Vol. 120, no. 11. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.120.117402.

19. High-Efficiency Dielectric Huygens' Surfaces / Manuel Decker [et al.] // Advanced Optical Materials. — 2015. — feb. — Vol. 3, no. 6. — P. 813–820. — URL: https://doi.org/10.1002/adom.201400584.

20. Invited Article: Broadband highly efficient dielectric metadevices for polarization control / Sergey Kruk [et al.] // APL Photonics. — 2016. — jun. — Vol. 1, no. 3. — P. 030801. — URL: https://doi.org/10.1063/1.4949007.

21. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces / Patrice Genevet [et al.] // Optica. — 2017. — jan. — Vol. 4, no. 1. — P. 139. — URL: https://doi.org/10.1364/optica.4.000139.

22. Staude Isabelle, Pertsch Thomas, Kivshar Yuri S. All-Dielectric Resonant Meta-Optics Lightens up // ACS Photonics. — 2019. — mar. — Vol. 6, no. 4. — P. 802–814. — URL: https://doi.org/10.1021/acsphotonics.8b01326.

23. Multipole analysis of dielectric metasurfaces composed of nonspherical nanoparticles and lattice invisibility effect / Pavel D. Terekhov [et al.] // Physical Review B. — 2019. — jan. — Vol. 99, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.99.045424.

24. Significance of the nonlocal optical response of metal nanoparticles in describing the operation of plasmonic lasers / Dasuni Lelwala Gamacharige [et al.] // Physical Review B. — 2019. — mar. — Vol. 99, no. 11. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.99.115405.

25. Perfect electromagnetic absorption using graphene and epsilon-near-zero metamaterials / Michael Lobet [et al.] // Physical Review B. — 2016. — jun. — Vol. 93, no. 23. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.93.235424.

26. Flexible transparent graphene/polymer multilayers for efficient electromagnetic field absorption / K. Batrakov [et al.] // Scientific Reports. — 2014. — nov. — Vol. 4, no. 1. — URL: https://doi.org/10.1038/srep07191.

27. Robust electromagnetic absorption by graphene/polymer heterostructures / Michaël Lobet [et al.] // Nanotechnology. — 2015. — jun. — Vol. 26, no. 28. — P. 285702. — URL: https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/28/285702.

28. Smolyaninov Igor I., Smolyaninova Vera N. Metamaterial superconductors // Physical Review B. — 2015. — mar. — Vol. 91, no. 9. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.91.094501.

29. Nanoscale Directional Motion towards Regions of Stiffness / Tienchong Chang [et al.] // Physical Review Letters. — 2015. — jan. — Vol. 114, no. 1. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.114.015504.

30. Stabilization and Manipulation of Electronically Phase-Separated Ground States in Defective Indium Atom Wires on Silicon / Hui Zhang [et al.] // Physical Review Letters. — 2014. — nov. — Vol. 113, no. 19. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.113.196802.

31. Delerue Christophe. Prediction of robust two-dimensional topological insulators based on Ge/Si nanotechnology // Physical Review B. — 2014. — aug. — Vol. 90, no. 7. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.90.075424.

32. Auffèves A., Richard M. Optical driving of macroscopic mechanical motion by a single two-level system // Physical Review A. — 2014. — aug. — Vol. 90, no. 2. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.90.023818.

33. Gerosa Matteo, Bottani Carlo Enrico. Multiple light scattering and near-field effects in a fractal treelike ensemble of dielectric nanoparticles // Physical Review B. — 2013. — may. — Vol. 87, no. 19. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.87.195312.

34. Büsser C. A., Feiguin A. E. Designing a symmetry-protected molecular device // Physical Review B. — 2012. — oct. — Vol. 86, no. 16. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.86.165410.

35. Yi Xin, Shi Xinghua, Gao Huajian. Cellular Uptake of Elastic Nanoparticles // Physical Review Letters. — 2011. — aug. — Vol. 107, no. 9. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.107.098101.

36. Tricarico Simone, Bilotti Filiberto, Vegni Lucio. Reduction of optical forces exerted on nanoparticles covered by scattering cancellation based plasmonic cloaks // Physical Review B. — 2010. — jul. — Vol. 82, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.82.045109.

37. Alù Andrea, Engheta Nader. All Optical Metamaterial Circuit Board at the Nanoscale // Physical Review Letters. — 2009. — sep. — Vol. 103, no. 14. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.103.143902.

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 Ulyanovsk State Pedagogical University.

E-mail: kostya_altunin@mail.ru

ORCID iD 0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID I-5739-2014

SCOPUS ID 57201126207

Авторский указатель

Алтунин, К. К., 42, 76, 115
Волкова, Е. Е., 33
Галоватюк, Т. В., 1
Карташова, А. А., 21
Причалова, Е. Н., 76
Торутанова, Е. В., 42