

ISSN 2712-8326



НАУКА ONLINE
SCIENCE ONLINE

Сетевое издание
№ 4 (25) | 2023

<http://nauka-online.ru/>

НАУКА ONLINE, № 4 (25), 2023.

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».

Адрес учредителя: 432071, Ульяновская область, город Ульяновск, площадь Ленина, дом 4/5.

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

Адрес издателя: 432071, Ульяновская область, город Ульяновск, площадь Ленина, дом 4/5.

Главный редактор: К. К. Алтунин.

Адрес редакции: Россия, 432071, Ульяновская область, город Ульяновск, площадь Ленина, дом 4/5.

Официальный сайт: <http://nauka-online.ru/>

E-mail: nauka_online@ulspu.ru

Science online, issue 4 (25), 2023.

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 Pedagogical University.

The address of the founder is 432071, Ulyanovsk region, Ulyanovsk city, Lenin square, 4/5.

Publisher: Ulyanovsk State Pedagogical University.

The address of the publisher is 432071, Ulyanovsk region, Ulyanovsk city, Lenin square, 4/5.

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

Editorial office address: Russia, 432071, Ulyanovsk region, Ulyanovsk city, 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».

Шишкарёв 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

1	Физические науки	1
1.1	Оптика	1
	<i>К. К. Алтунин, Е. С. Железникова, В. В. Соколова.</i> Исследование оптического отражения и пропускания нанокompозитной структуры с металлическими наночастицами	1
	<i>К. К. Алтунин.</i> Нелокальные полевые уравнения в наноструктурах с учётом высших мультипольных моментов	29
	<i>О. Н. Захарова, А. С. Федотова.</i> Исследование направленного оптического излучения квантовых точек в наноматериале	44
2	Компьютерные науки и информатика	53
2.1	Теоретическая информатика	53
	<i>К. К. Алтунин, И. А. Шарнина.</i> Разработка дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей	53
	<i>В. М. Тимченко.</i> Проектирование дистанционного курса по физике мезоскопических систем	80
3	Науки об образовании	91
3.1	Теория и методика обучения и воспитания	91
	<i>А. А. Лебедев.</i> Элементы организации процесса изучения физики в техническом колледже	91
	<i>Е. С. Фролова.</i> Организация систематического контроля знаний по физике в классах коррекционного-развивающего обучения	112
	Авторский указатель	122

CONTENTS

1	Physical sciences	1
1.1	Optics	1
	Investigation of optical reflection and transmission of a nanocomposite structure with metal nanoparticles <i>K. K. Altunin, E. S. Zheleznikova, V. V. Sokolova</i>	1
	Nonlocal field equations in nanostructures taking into account higher multipole moments <i>K. K. Altunin</i>	29
	Investigation of directed optical emission of quantum dots in nanomaterial <i>O. N. Zakharova, A. S. Fedotova</i>	44
2	Computer science and information science	53
2.1	Theoretical computer science	53
	Development of a distance course on the optics of graphene metasurfaces <i>K. K. Altunin, I. A. Sharnina</i>	53
	Designing a distance course on the physics of mesoscopic systems <i>V. M. Timchenko</i>	80
3	Educational sciences	91
3.1	Theory and methodology of training and education	91
	Elements of organizing the process of studying physics in a technical college <i>A. A. Lebedev</i>	91
	Organization of systematic monitoring of knowledge in physics in classes of correctional and developmental education <i>E. S. Frolova</i>	112
	Author's index	123

Секция 1

Физические науки

1.1 Оптика

Научная статья

УДК 535.31

ББК 22.343

ГРНТИ 29.31.21

ВАК 1.3.6.

PACS 42.25.Bs

OCIS 310.6860

MSC 00A79

Исследование оптического отражения и пропускания нанокомпозитной структуры с металлическими наночастицами

К. К. Алтунин , Е. С. Железникова , В. В. Соколова  ¹

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

Поступила в редакцию 5 октября 2023 года

После переработки 12 октября 2023 года

Опубликована 12 декабря 2023 года

Аннотация. Рассматривается оптическое отражение и пропускание нанокомпозитной структуры с металлическими наночастицами, находящейся в поле оптического излучения. Представлены результаты численных расчётов энергетических коэффициентов оптического отражения и пропускания от поверхности нанокомпозитной плёнки с наночастицами серебра при различных углах падения излучения на поверхность нанокомпозитной плёнки.

Ключевые слова: оптическое пропускание, оптическое отражение, оптическое излучение, нанокомпозит, наноструктура, наночастица, наночастицы серебра

¹E-mail: sokolovavasilevna2002@inbox.ru

Введение

Актуальность исследования обусловлена возрастающим интересом к наноматериалам с наночастицами. Наноматериалы находят всё более широкое применение в различных технологических процессах получения новых наноразмерных оптоэлектронных приборов. В настоящее время отмечается значительный подъём научного интереса к разработке и исследованию физических свойств нанокompозитных материалов, в которых в качестве включений применяются металлические наночастицы.

Интенсивное развитие технологии создания оптических покрытий приводит к необходимости разработки последовательной теории оптических процессов в различных нанокompозитных покрытиях. В настоящей работе будут рассматриваться нанокompозитные покрытия, содержащие металлические наночастицы. Включение металлических наночастиц в диэлектрическую матрицу приводит к необходимости последовательного учёта квантовомеханических и наноплазмонных процессов. Производство нанокompозитов представляет собой высокотехнологичную отрасль и требует проведения серьёзных научных исследований в области нанотехнологий.

Целью работы является исследование оптических свойств нанокompозитных структур с металлическими наночастицами, находящихся во внешнем поле оптического излучения. Задачи работы состоят из анализа научных работ по классификации наноструктур и описания физических свойств наноструктур с металлическими наночастицами, находящихся во внешнем поле оптического излучения.

Объектом исследования является нанокompозит с металлическими наночастицами. Предметом исследования является система физических характеристик оптических процессов в нанокompозитных структурах с металлическими наночастицами, находящихся во внешнем поле оптического излучения.

В качестве методов исследования используется анализ и моделирование физических характеристик нанокompозитных структур с металлическими наночастицами. Методы исследования включают в себя теоретические методы современной оптики для расчёта оптических характеристик нанокompозитных структур с наночастицами, численные методы расчёта оптических характеристик наноматериалов с наночастицами, методы программирования для реализации численных методов расчёта оптических характеристик нанокompозитных структур, численные методы оптимизации физических параметров оптических процессов в нанокompозитных структурах с наночастицами. В качестве материалов исследования используются нанокompозитные материалы, содержащие наночастицы, которые могут быть изменять распределение по объёму или по поверхности нанокompозитной среды. Материалом исследования является набор нанокompозитных структур с металлическими наночастицами, находящимися в поле оптического излучения.

Гипотеза исследования состоит в том, что если использовать современные методы анализа физических свойств наноструктур с металлическими наночастицами, то можно прогнозировать состояния нанокompозитных сред с металлическими наночастицами в составе более сложных наноструктур в наноразмерных оптоэлектронных приборах и устройствах нанoeлектроники на основе нанокompозитных сред с металлическими наночастицами.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что физические свойства наноматериалов могут быть использованы в создании новой методологии физико-технического образования на основе пополнения научной базы физических свойств наноматериалов. Практическая значимость исследования заключается в совершенствовании материалов темы по изучению физических свойств наноматериалов, которые могут быть использованы для развития методологии физико-технического образования.

Обзор работ по физическим свойствам нанокompозитов

В поиске новых функциональных материалов одним из наиболее перспективным направлением является разработка композитов со структурами нанометрового размера или квантовыми точками, рассеянными в твёрдых матрицах. В частности, композиты, построенные из аморфных матриц и наноразмерных кластеров высокой плотности металлического, полупроводникового или диэлектрического типа привлекают внимание исследователей благодаря своим отличительным оптическим, электронным, тепловым, или механическим свойствам. Их многочисленные технологические приложения включают в себя элементы с нулевым тепловым расширением, очень твёрдые или архитектурные материалы, костные имплантаты, магнитные подложки дисков памяти, люминесцентные солнечные концентраторы или, в телекоммуникационной отрасли активные и пассивные оптические устройства. Будущие приложения этого типа нанокристаллических композитов, вероятно, будут использовать узкоспециализированные инженерные свойства по запросу. Помимо композиционных изменений и производственного процесса альтернативным способом добавления новых функциональных возможностей материалам в целом и нанокристаллическим композитам в частности является использование технологии высокого давления. Действительно, высокое давление дает возможность синтезировать твёрдые тела с уникальными оптическими, электронными, магнитными или термомеханическими свойствами, что в настоящее время является серьёзной проблемой в материаловедении. Структурные превращения под давлением в нанокристаллических композитах интересны с точки зрения фундаментальной науки, а также очень привлекательны с захватывающей перспективой создания новых материалов. Глубокие изменения фундаментальных свойств нанокристаллических композитов в ответ на повышенное давление могут показать иной путь к развитию технологически важных наноматериалов.

В статье [1] получен боковой фотогальванический эффект с максимальной чувствительностью 308.3 мВ/мм, что является очень большим значением чувствительности в области органических материалов, даже сравнимым с заявленной чувствительностью большинства неорганических материалов.

Переходные электронные устройства, составляющие основу инновационной эволюции современной электроники, относятся к устройствам, которые могут физически исчезнуть по требованию, широко исследовались в различных приложениях [2–4], особенно в новой области, связанной с органическими материалами [5, 6]. Природный биологический материал, белок шелка, обладает превосходными свойствами, такими как биосовместимость, биоразлагаемость и безвредность для окружающей среды [7, 8], что проложило путь ко многим приложениям, включая имплантируемую биоэлектронику, носимые технологии и экологичные переходные биоэлектронные и фотонные устройства [9–11].

В статье [12] исследована температурная зависимость поглощения микроволн магнитами со случайной анизотропией. Он определяется сильной метастабильностью из-за широкого распределения энергетических барьеров, разделяющих различные спиновые конфигурации. При малой мощности СВЧ, когда нагрев пренебрежимо мал, спиновая динамика близка к линейной. Это соответствует прецессии ферромагнитно упорядоченных областей, находящихся в резонансе с микроволновым полем.

В статье [13] исследованы методы синхротронной рентгеновской дифракции и ячейки с алмазными наковальнями использовались для характеристики фазовых превращений и оценки структурной стабильности разработанного нанокристаллического композита при повышенных давлениях.

Антиотражающие покрытия превратились в высокоэффективные компоненты, снижающие отражающую способность и блики, для различного оптического и оптоэлек-

трического оборудования. При прохождении сквозь линзу свет частично поглощается и отражается от её поверхностей из-за разных коэффициентов преломления материала линзы и окружающей воздушной среды. При этом отражённые лучи приводят к возникновению мешающих отражений и снижают четкость восприятия изображения. Если антибликовое покрытие состоит из одного слоя, уменьшение прохождения светового потока происходит только в одной определенной части спектра, поэтому для охвата всего спектра видимого света наносят несколько покрытий, соответствующих разным частям диапазона. Оптическое явление отражения, возникает из-за перехода в среде, в которой распространяется свет. Среда (стекло, вода, воздух) оптически характеризуется параметром, показателем преломления, который количественно определяет скорость света в текущей среде по отношению к скорости света в вакууме. Таким образом, по мере распространения света глаза могут обнаружить оптические нарушения, если есть изменение показателя преломления. Многие покрытия состоят из прозрачных тонкопленочных структур с чередующимися слоями с контрастным показателем преломления. Толщина слоя выбирается для создания деструктивной интерференции в лучах, отраженных от границ раздела, и конструктивной интерференции в соответствующих прошедших лучах. Это приводит к изменению характеристик конструкции в зависимости от длины волны и угла падения, поэтому цветовые эффекты часто проявляются под косыми углами.

Есть две отдельные причины оптических эффектов из-за покрытий, которые часто называют толстопленочными и тонкопленочными эффектами. Эффекты толстой пленки возникают из-за разницы в показателе преломления между слоями выше и ниже покрытия (или пленки); в простейшем случае эти три слоя — воздух, покрытие и стекло. Толстопленочные покрытия не зависят от толщины покрытия, если оно намного толще длины волны света. Эффект тонкой пленки возникает, когда толщина покрытия примерно равна четверти или половине длины волны света. В этом случае отражения постоянного источника света могут быть добавлены деструктивно, и, следовательно, уменьшить отражения с помощью отдельного механизма. Тонкопленочные покрытия зависят не только от толщины пленки и длины волны света, но и от угла, под которым свет падает на поверхность с покрытием. Всякий раз, когда луч света перемещается из одной среды в другую (например, когда свет попадает в лист стекла после прохождения через воздух), некоторая часть света отражается от поверхности (известной как граница раздела) между двумя средами. Это можно наблюдать, например, если смотреть через окно, где можно увидеть (слабое) отражение от передней и задней поверхностей оконного стекла. Сила отражения зависит от соотношения показателей преломления двух сред, а также от угла наклона поверхности к лучу света. Именно уравнение Френеля предлагает базовую предварительную математическую модель отражения и преломления. Уравнения Френеля (или коэффициенты Френеля) описывают отражение и передачу света (или электромагнитного излучения в целом) при падении на границу раздела между различными оптическими средами. Когда свет падает на границу раздела между средой с показателем преломления n_1 и второй средой с показателем преломления n_2 , могут происходить как отражение, так и преломление света. Уравнения Френеля описывают отношения электрических полей отраженных и прошедших волн к электрическому полю падающей волны (магнитные поля волн также можно связать с помощью аналогичных коэффициентов). Поскольку это комплексные отношения, они описывают не только относительную амплитуду, но и фазовые сдвиги между волнами. Уравнения предполагают, что граница раздела между средами плоская, а среда однородная и изотропная. Предполагается, что падающий свет представляет собой плоскую волну, что достаточно для решения любой проблемы, поскольку любое падающее световое поле может быть разложено на плоские волны и поляризации. Согласно Огюстену-Жану

Френелю, доля падающего света, отражённого на границе раздела, измеряется коэффициентом отражения, а остальная часть прошедшего (преломлённого) света измеряется коэффициентом пропускания.

В статье [14] оптимизированы многослойные просветляющие покрытия для фотоэлектрических устройств, используя современные эволюционные алгоритмы. Применяется строгая методология, чтобы показать, что данная структура, которая является особенно регулярной (то есть существенно периодической), возникает спонтанно и систематически в очень широком диапазоне условий. Сама регулярность структуры позволяет провести тщательный физический анализ того, как работает конструкция. Это позволяет понять, что центральная часть представляет собой фотонный кристалл, используемый в качестве буфера для света, и что внешние слои предназначены для уменьшения несоответствия импеданса между внешней средой и блоховской модой, поддерживаемой фотонным кристаллом. Показано, как оптимизация может предлагать новые правила проектирования и рассматриваться как источник вдохновения. Изготовлены конструкции с помощью легко развёртываемых технологий.

В статье [15] резонаторные оптомеханические системы предлагают мощный способ оптически манипулировать движением механических осцилляторов, начиная от наноразмерных объектов, таких как нанолучи и микротороидальные резонаторы, к макроскопическим объектам, таким как Интерферометры Фабри-Перо с подвесными зеркалами [16]. А ярким примером является лазерное охлаждение механических движение в основное квантовое состояние, достигаемое как в микроволновом и оптическом режимах [17, 18]. Зрелость этих методы и технологии могут сделать квантовый контроль над макроскопическими объектами реальностью. Это имеет основополагающее значение интерес к исследованию квантовых свойств макроскопических механические осцилляторы, такие как запутанность и декогеренция [19]. С другой стороны, существует широкий спектр оптико-механические системные приложения. Беспрецедентный точность в перемещении и измерении силы с использованием механические генераторы были приняты для сверхчувствительных измерения [20].

Используя чередующиеся слои материала с низким показателем преломления, такого как диоксид кремния, и материала с более высоким показателем преломления, можно получить коэффициент отражения всего 0.1% на одной длине волны. Также могут быть изготовлены покрытия, которые дают очень низкую отражательную способность в широком диапазоне частот, хотя они являются сложными и относительно дорогими. Оптические покрытия также могут быть изготовлены с особыми характеристиками, такими как почти нулевое отражение на нескольких длинах волн или оптимальные характеристики при углах падения, отличных от 0° . Дополнительной категорией просветляющих покрытий являются «поглощающие дуги». Эти покрытия полезны в ситуациях, когда высокое пропускание через поверхность неважно или нежелательно, но требуется низкая отражательная способность. Они могут обеспечивать очень низкий коэффициент отражения при небольшом количестве слоёв и часто могут производиться дешевле или в большем масштабе, чем стандартные непоглощающие просветляющие покрытия. Поглощающие антиотражающие покрытия часто используют необычные оптические свойства, проявляемые составными тонкими плёнками, полученными путём напыления. Так, например, нитрид титана и нитрид ниобия используются в поглощающих дугах.

Модель

Амплитудные коэффициенты отражения оптической волны в нанокompозитной среде вычисляются по формулам:

$$r_{01}^s = \frac{\cos \theta_0 - \sqrt{n_{10}^2 - \sin^2 \theta_0}}{\cos \theta_0 + \sqrt{n_{10}^2 - \sin^2 \theta_0}}, \quad (1)$$

$$r_{01}^p = \frac{n_{10}^2 \cos \theta_0 - \sqrt{n_{10}^2 - \sin^2 \theta_0}}{n_{10}^2 \cos \theta_0 + \sqrt{n_{10}^2 - \sin^2 \theta_0}}, \quad (2)$$

где θ_0 - угол падения внешнего оптического излучения на границу раздела двух сред, n_{10} - относительный показатель преломления оптического излучения на границе раздела двух сред. Амплитудные коэффициенты пропускания оптической волны в нанокompозитной среде вычисляются по формулам:

$$t_{01}^s = \frac{2 \cos \theta_0}{\cos \theta_0 + \sqrt{n_{10}^2 - \sin^2 \theta_0}}, \quad (3)$$

$$t_{01}^p = \frac{2n_{10}^2 \cos \theta_0}{n_{10}^2 \cos \theta_0 + \sqrt{n_{10}^2 - \sin^2 \theta_0}}, \quad (4)$$

Коэффициенты Френеля по энергии для отражения оптической волны в нанокompозитной среде вычисляются по формулам:

$$R_{01}^s = |r_{01}^s|^2, \quad (5)$$

$$R_{01}^p = |r_{01}^p|^2, \quad (6)$$

$$R_{01} = \frac{1}{2} (R_{01}^s + R_{01}^p). \quad (7)$$

Коэффициенты Френеля по энергии для пропускания оптической волны в нанокompозитной среде вычисляются по формулам:

$$T_{01}^s = \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0} |t_{01}^s|^2, \quad (8)$$

$$T_{01}^p = \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0} |t_{01}^p|^2, \quad (9)$$

$$T_{01} = \frac{1}{2} (T_{01}^s + T_{01}^p). \quad (10)$$

Амплитудный коэффициент отражения оптической волны в нанокompозитной плёнке на полубесконечной подстилающей среде вычисляется по формуле [21]:

$$r_1 = \frac{r_{01} + r_{12} \exp(i2\varphi_1)}{1 + r_{01}r_{12} \exp(i2\varphi_1)}. \quad (11)$$

Здесь $\varphi_1 = k_0 d_1 \sqrt{n_{10}^2 - \sin^2 \theta_0}$, d_1 - толщина нанокompозитной плёнки, $k_0 = 2\pi/\lambda$ - волновое число света в вакууме, λ - длина волны оптического излучения. Амплитудный коэффициент пропускания оптической волны в нанокompозитной плёнке на полубесконечной подстилающей среде вычисляется по формуле

$$t_1 = \frac{t_{01}t_{12} \exp(i\varphi_1)}{1 + r_{01}r_{12} \exp(i2\varphi_1)}. \quad (12)$$

Коэффициенты Френеля по энергии для отражения оптической волны в нанокompозитной плёнке на полубесконечной подстилающей среде вычисляются по формулам:

$$R_1^s = |r_1^s|^2, \quad (13)$$

$$R_1^p = |r_1^p|^2, \quad (14)$$

$$R_1 = \frac{1}{2} (R_1^s + R_1^p). \quad (15)$$

Коэффициенты Френеля по энергии для пропускания оптической волны в нанокompозитной плёнке на полубесконечной подстилающей среде вычисляются по формулам:

$$T_1^s = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_0 \cos \theta_0} |t_1^s|^2, \quad (16)$$

$$T_1^p = \frac{n_2 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_2} |t_1^p|^2, \quad (17)$$

$$T_1 = \frac{1}{2} (T_1^s + T_1^p). \quad (18)$$

Комплексный показатель преломления нанокompозитной плёнки в приближении эффективной среды вычислим по формуле [22]:

$$n_1 = f_1 n_1^p + (1 - f_1) n_1^m. \quad (19)$$

где f_1 – фактор заполнения нанокompозитной плёнки металлическими наночастицами, n_1^p – комплексный показатель преломления системы наноразмерных включений в виде металлических наночастиц, n_1^m – комплексный показатель преломления матрицы нанокompозитной плёнки. В качестве матрицы нанокompозитной плёнки выбрано стекло BK7.

Квадрат показателя преломления системы наноразмерных включений в виде металлических наночастиц находится по формуле Друде

$$(n_1(\omega))^2 = \varepsilon_1^p(\omega) = \varepsilon_1^\infty - \frac{\omega_{1p}^2}{\omega(\omega + i\gamma_1)}. \quad (20)$$

где коэффициент затухания находится по формуле

$$\gamma_1 = \gamma_{01} + A_{p1} \frac{v_{F1}}{a_1}, \quad (21)$$

где a_1 – радиус металлических наночастиц, v_{F1} – скорость Ферми для носителей заряда в металлических наночастицах, A_{p1} – коэффициент Пирсона.

Произведём описание нанокompозитной структуры для двух нанокompозитных сред в приближении эффективной среды.

Эффективная диэлектрическая проницаемость первой нанокompозитной среды находится по формуле Максвелл-Гарнетта:

$$\varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_1^m(\omega) \left(1 + \frac{f_1 (\varepsilon_1^p(\omega) - \varepsilon_1^m(\omega))}{\varepsilon_1^m + g_1 (1 - f_1) (\varepsilon_1^p(\omega) - \varepsilon_1^m(\omega))} \right), \quad (22)$$

где f_1 – фактор заполнения первой нанокompозитной среды металлическими наночастицами, g_1 – деполяризующий фактор системы наноразмерных включений в первой нанокompозитной среде, ε_1^p – диэлектрическая проницаемость наноразмерных включений в виде металлических наночастиц, ε_1^m – диэлектрическая проницаемость материала матрицы первой нанокompозитной среды.

Эффективная диэлектрическая проницаемость второй нанокompозитной среды находится по формуле Максвелл-Гарнетта:

$$\varepsilon_2(\omega) = \varepsilon_2^m(\omega) \left(1 + \frac{f_2(\varepsilon_2^p(\omega) - \varepsilon_2^m(\omega))}{\varepsilon_2^m + g_2(1 - f_2)(\varepsilon_2^p(\omega) - \varepsilon_2^m(\omega))} \right), \quad (23)$$

где f_2 – фактор заполнения второй нанокompозитной среды металлическими наночастицами, g_2 – деполаризующий фактор системы наноразмерных включений во второй нанокompозитной среде, ε_2^p – диэлектрическая проницаемость наноразмерных включений в виде металлических наночастиц, ε_2^m – диэлектрическая проницаемость материала матрицы второй нанокompозитной среды.

Диэлектрическая проницаемость материала матрицы в составе нанокompозитной среды находится по формуле:

$$\varepsilon_1^m(\lambda) = \varepsilon_1^{PMA}(\lambda) = 1 + \frac{1.1819\lambda^2}{\lambda^2 - 0.011313}, \quad (24)$$

где длина волны подставляется в микрометрах.

Диэлектрическая проницаемость материала наноразмерных включений в виде наночастиц серебра сферической формы находится по формуле:

$$\varepsilon_1^p(\omega) = \varepsilon_{\infty 1} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_{e1})}, \quad (25)$$

где циклическая частота излучения $\omega = 2\pi c/\lambda$.

Коэффициент затухания находится по формуле

$$\gamma_{e1} = \gamma_{01} + A_{p1} \frac{v_{F1}}{a_1}, \quad (26)$$

A_{p1} – коэффициент Пирсона, для серебра скорость Ферми равна $v_F = 1.39 \cdot 10^6$ м/с.

Для объёмного серебра известны следующие параметры: $\varepsilon_{\infty 1} = 4.1$, $\omega_p = 1.33 \cdot 10^{16}$ с⁻¹, $\gamma_{01} = 7.7 \cdot 10^{13}$ с⁻¹.

Результаты численных расчётов оптических характеристик нанокompозитов

В ходе исследования нанокompозитных плёнок составлена компьютерная программа, позволяющая вычислять зависимость коэффициента Френеля по энергии для отражения от поверхности нанокompозитной плёнки с наночастицами серебра от длины волны падающего оптического излучения.

В качестве основных начальных параметров для начала организации численных расчётов оптических характеристик нанокompозитной системы выбираются следующие параметры: угол падения внешнего излучения, диапазон длин волн излучения для построения спектров отражения и пропускания, характерные размеры включений, фактор заполнения наночастицами нанокompозитной плёнки.

Основной расчётный блок разработанной компьютерной программы на языке программирования Python начинается с описания функций, характеризующих дисперсионные зависимости диэлектрической проницаемости материала матрицы и материала включений, магнитной проницаемости материала матрицы и материала включений, комплексного показателя преломления материала матрицы и материала системы включений из металлических наночастиц. Ключевую часть компьютерной программы для расчёта оптических свойств нанокompозитных структур составляют различные формулы смешения, позволяющие рассчитывать эффективные параметры нанокompозитов

с наночастицами. В компьютерной программе реализованы функциональные зависимости эффективных параметров различных материалов в нанокompозитных структурах таких, как эффективная диэлектрическая проницаемость, эффективная магнитная проницаемость, эффективный показатель преломления и эффективный поверхностный импеданс нанокompозитной среды с металлическими наночастицами, находящейся во внешнем поле оптического излучения.

Рассмотрим результаты численных расчётов энергетических коэффициентов оптического пропускания однослойной нанокompозитной плёнки с наночастицами серебра, расположенной на подложке из стекла типа BK7.

Рассмотрим нанокompозитную плёнку, состоящую из полимерной матрицы и включений в виде сферических наночастиц серебра. Для того чтобы оценить соотношение оптических констант компонент нанокompозитной среды, воспользуемся теорией Максвелла–Гарнетта. Согласно этой теории может быть найдена эффективная диэлектрическая проницаемость двухкомпонентной гетерогенной среды.

Применим модель эффективной среды для описания двух нанокompозитных сред. Эффективная диэлектрическая проницаемость среды j вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_j = \varepsilon_j^m \left(1 + \frac{f_j (\varepsilon_j^p - \varepsilon_j^m)}{\varepsilon_j^m + g_j (1 - f_j) (\varepsilon_j^p - \varepsilon_j^m)} \right). \quad (27)$$

где ε_j^m — диэлектрическая проницаемость матрицы в среде j , ε_j^p — диэлектрическая проницаемость наночастиц серебра в среде j , f_j — объёмная доля включений в среде j , g_j — деполяризующий фактор. В случае сферических наночастиц деполяризующий фактор $g_j = 1/3$. Эффективная диэлектрическая проницаемость наночастиц в среде j имеет вид:

$$\varepsilon_{1p}(\omega) = 1 - \frac{\omega_{1p}^2 - \omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\omega\Gamma_1}. \quad (28)$$

где введено обозначение

$$\Gamma_j = \gamma_{Cj} + A_j \frac{v_{Fj}}{a_j}. \quad (29)$$

v_{Fj} — скорость Ферми для металлических наночастиц, a_j — радиус металлических наночастиц в нанокompозитной среде j .

Типичной рассматриваемой системой является структура, составленная из металлических частиц, внедрённых в диэлектрическую матрицу. Для анализа подобных структур часто применяют численные методы, в частности метод конечных элементов или метод моментов. Однако с помощью этих методов нельзя достичь физического понимания свойств подобных структур. Альтернативным методом описания композитных структур является использование эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей. Обычно в этом случае применяют теорию Максвелл–Гарнетта. Однако эта теория непригодна, когда частицы занимают более 30% объёма композитной среды. Кроме того, теория Максвелл–Гарнетта неприменима, когда расстояние между частицами, составляющими композитную среду, оказывается сравнимым с длиной волны внешнего излучения оптического излучения. Во всех этих случаях приходится использовать специальные методы расчёта оптических свойств композитных материалов.

В зависимости от типа основной матрицы, занимающей большую часть объёма нанокompозитного материала, нанокompозиты принято подразделять на три категории. Нанокompозиты на основе керамической матрицы улучшают оптические и электрические свойства первоначального материала (керамического соединения, состоящего из смеси оксидов, нитридов, силицидов и т.д.). В нанокompозитах на основе металлической матрицы так называемым усиливающим материалом (нанокомпонентом) часто служат

углеродные нанотрубки, повышающие прочность и электрическую проводимость. Полимерные нанокомпозиты содержат полимерную матрицу с распределёнными по ней наночастицами или нанонаполнителями, которые могут иметь сферическую, плоскую или волокнистую структуру.

Рассмотрим возможность использования серебра в качестве материала для наночастиц нанокомпозита. Это обусловлено тем, что серебро, в отличие от других металлов, в оптическом диапазоне имеет сравнительно небольшую мнимую часть диэлектрической проницаемости. Для того чтобы рассеяние на частицах композита было рэлеевским и композит для внешнего излучения можно было считать однородной средой, размеры частиц должны быть намного меньше длины волны оптического излучения.

В качестве основных начальных параметров для начала организации численных расчётов оптических характеристик нанокомпозитной системы выбираются следующие параметры: угол падения внешнего излучения, диапазон длин волн излучения для построения спектров отражения и пропускания, характерные размеры включений, фактор заполнения наночастицами нанокомпозитной плёнки.

Основной расчётный блок разработанной компьютерной программы, написанный на языке Python, начинается с описания функций, характеризующих дисперсионные зависимости диэлектрической проницаемости материала матрицы и материала включений, магнитной проницаемости материала матрицы и материала включений, комплексного показателя преломления материала матрицы и материала системы включений из металлических наночастиц. Ключевую часть компьютерной программы для расчёта оптических свойств нанокомпозитных структур составляют различные формулы смешения, позволяющие рассчитывать эффективные параметры нанокомпозитов с наночастицами. В компьютерной программе реализованы функциональные зависимости эффективных параметров различных материалов в нанокомпозитных структурах таких, как эффективная диэлектрическая проницаемость, эффективная магнитная проницаемость, эффективный показатель преломления и эффективный поверхностный импеданс нанокомпозитной среды с металлическими наночастицами, находящейся во внешнем поле оптического излучения.

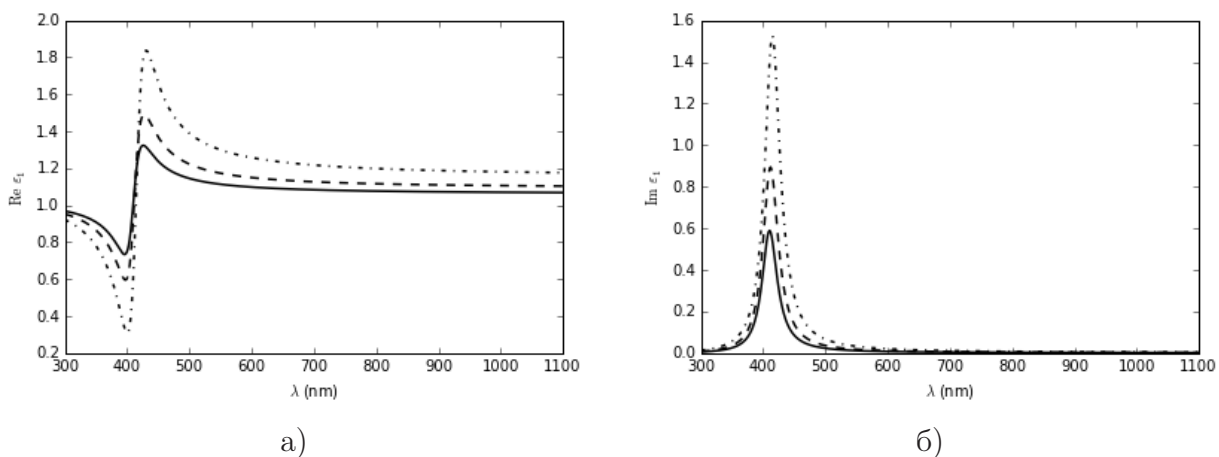


Рис. 1. Графики зависимостей действительной и мнимой частей эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

На рис. 1 изображены зависимости графики зависимостей действительной и мнимой частей эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из полиметилме-

такрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

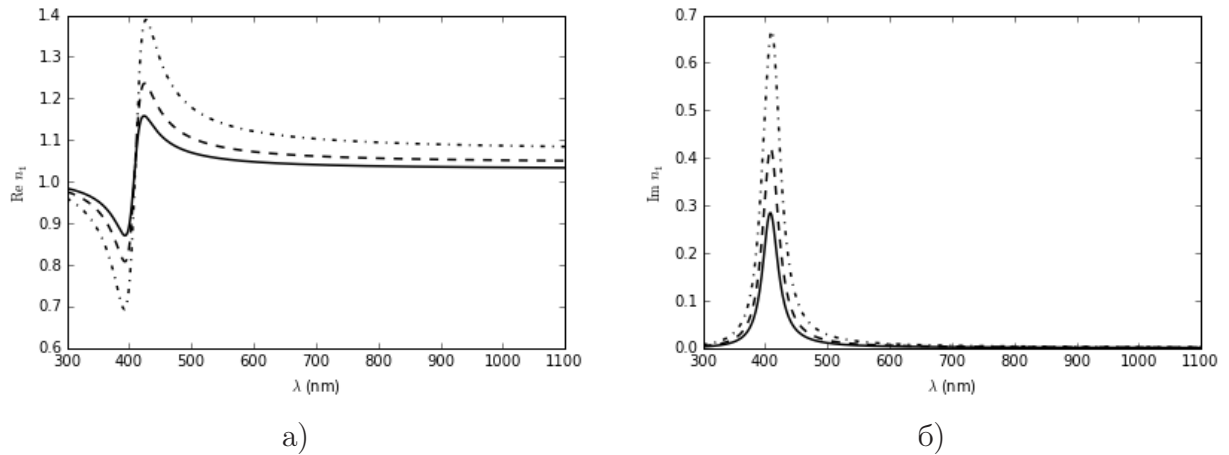


Рис. 2. Графики зависимостей модуля эффективной диэлектрической проницаемости и модуля эффективного показателя преломления нанокompозита из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

На рис. 2 изображены зависимости графики зависимостей модуля эффективной диэлектрической проницаемости и модуля эффективного показателя преломления нанокompозита из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

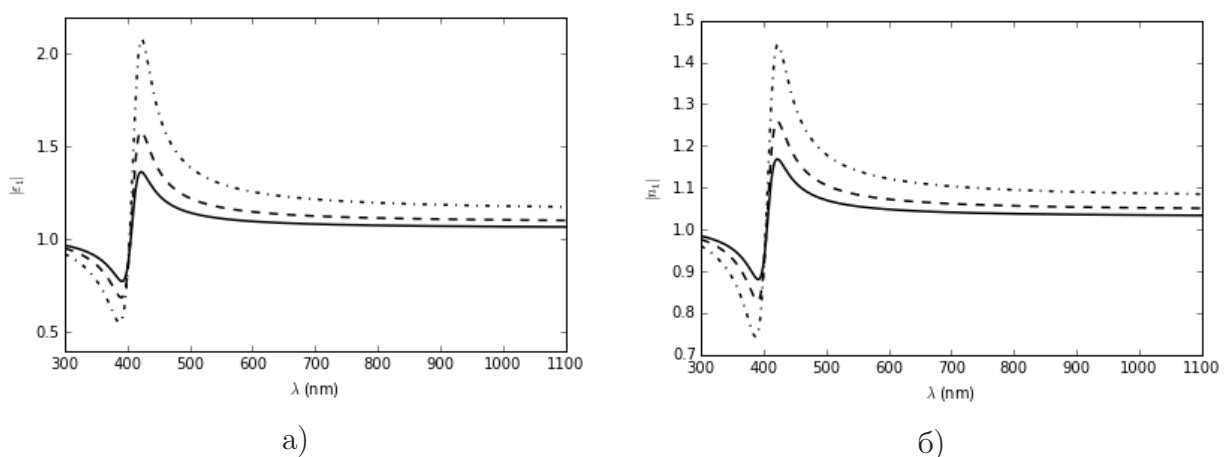


Рис. 3. Графики зависимостей действительной и мнимой частей эффективного показателя преломления нанокompозита из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

На рис. 3 изображены зависимости графики зависимостей действительной и мнимой частей эффективного показателя преломления нанокompозита из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии),

$f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

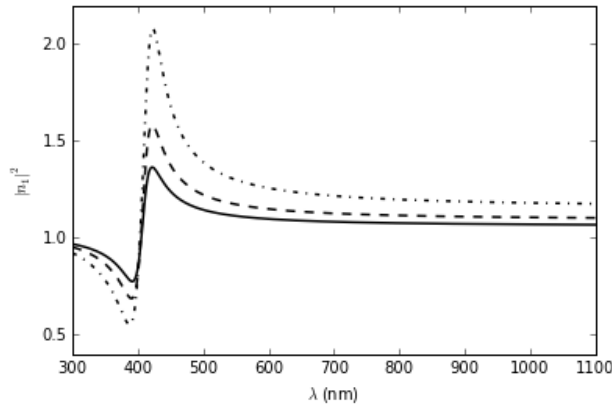


Рис. 4. Графики зависимости квадрата модуля эффективного показателя преломления нанокompозита из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

На рис. 4 приведено изображение графиков зависимости квадрата модуля эффективного показателя преломления нанокompозита из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

На рис. 5 изображены зависимости энергетических коэффициентов оптического отражения от длины волны оптического излучения для случая падения s -поляризованной оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокompозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 0^\circ$, б) $\theta_0 = 10^\circ$, в) $\theta_0 = 20^\circ$, г) $\theta_0 = 30^\circ$.

На рис. 6 изображены зависимости энергетических коэффициентов оптического пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения s -поляризованной оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокompозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 0^\circ$, б) $\theta_0 = 10^\circ$, в) $\theta_0 = 20^\circ$, г) $\theta_0 = 30^\circ$.

На рис. 7 изображены зависимости энергетических коэффициентов оптического отражения от длины волны оптического излучения для случая падения s -поляризованной оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокompозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 35^\circ$, б) $\theta_0 = 40^\circ$, в) $\theta_0 = 45^\circ$, г) $\theta_0 = 50^\circ$.

На рис. 8 изображены зависимости энергетических коэффициентов оптического пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения s -поляризованной

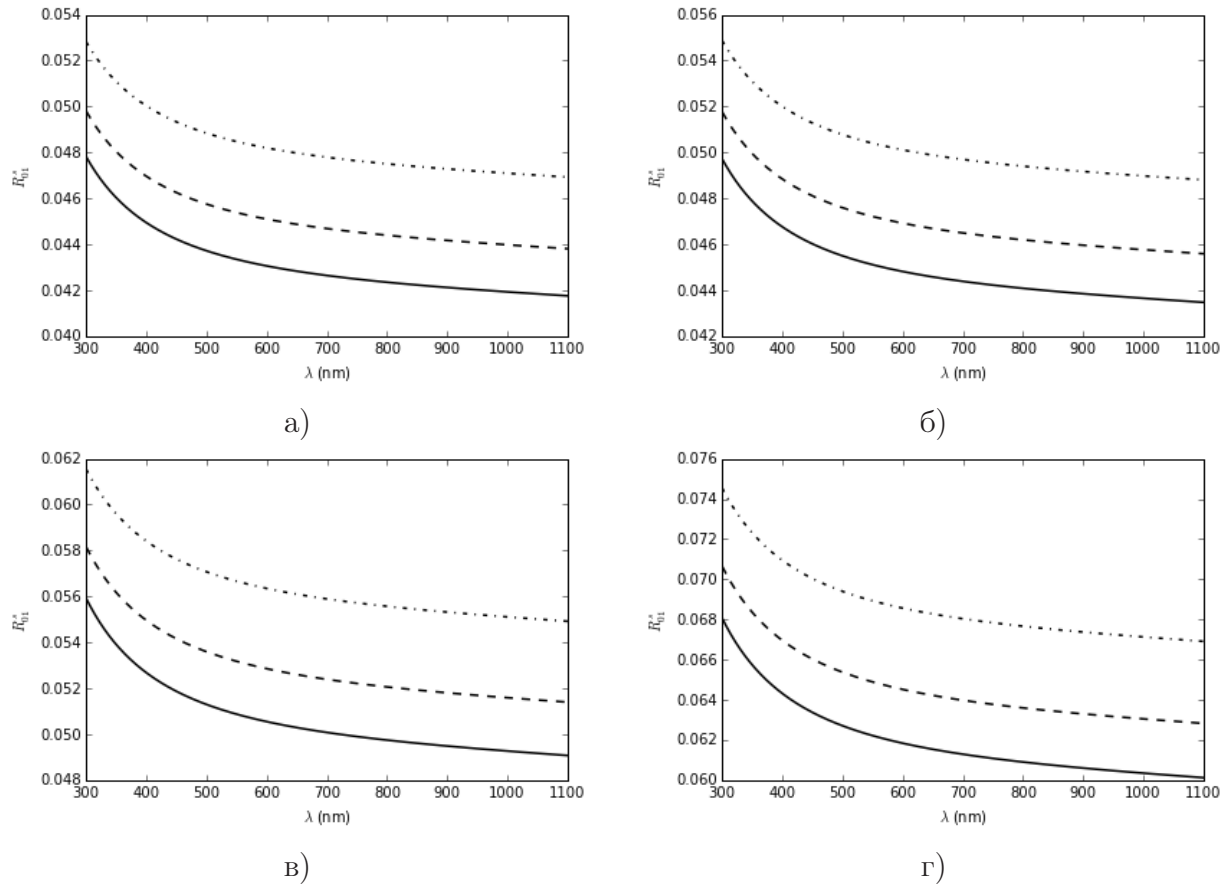


Рис. 5. Зависимости энергетических коэффициентов оптического отражения от длины волны оптического излучения для случая падения s -поляризованной оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокомпозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 0^\circ$, б) $\theta_0 = 10^\circ$, в) $\theta_0 = 20^\circ$, г) $\theta_0 = 30^\circ$.

оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокомпозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 35^\circ$, б) $\theta_0 = 40^\circ$, в) $\theta_0 = 45^\circ$, г) $\theta_0 = 50^\circ$. Из анализа полученных зависимостей, что рассматриваемые нанокомпозитные плёнки обладают слабой угловой зависимостью энергетического коэффициента отражения в широком диапазоне оптических длин волн.

В следующей части расчётов диэлектрическая проницаемость материала наноразмерных включений в виде наночастиц серебра сферической формы находится по формуле:

$$\varepsilon_1^p(\omega) = \varepsilon_{\infty 1} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_{e1})}, \quad (30)$$

где циклическая частота излучения $\omega = 2\pi c/\lambda$.

В следующей части расчётов коэффициент затухания находится по формуле

$$\gamma_{e1} = \gamma_{01} + (0.71 + (1 - f_1) 0.31) \frac{v_{F1}}{a_1}, \quad (31)$$

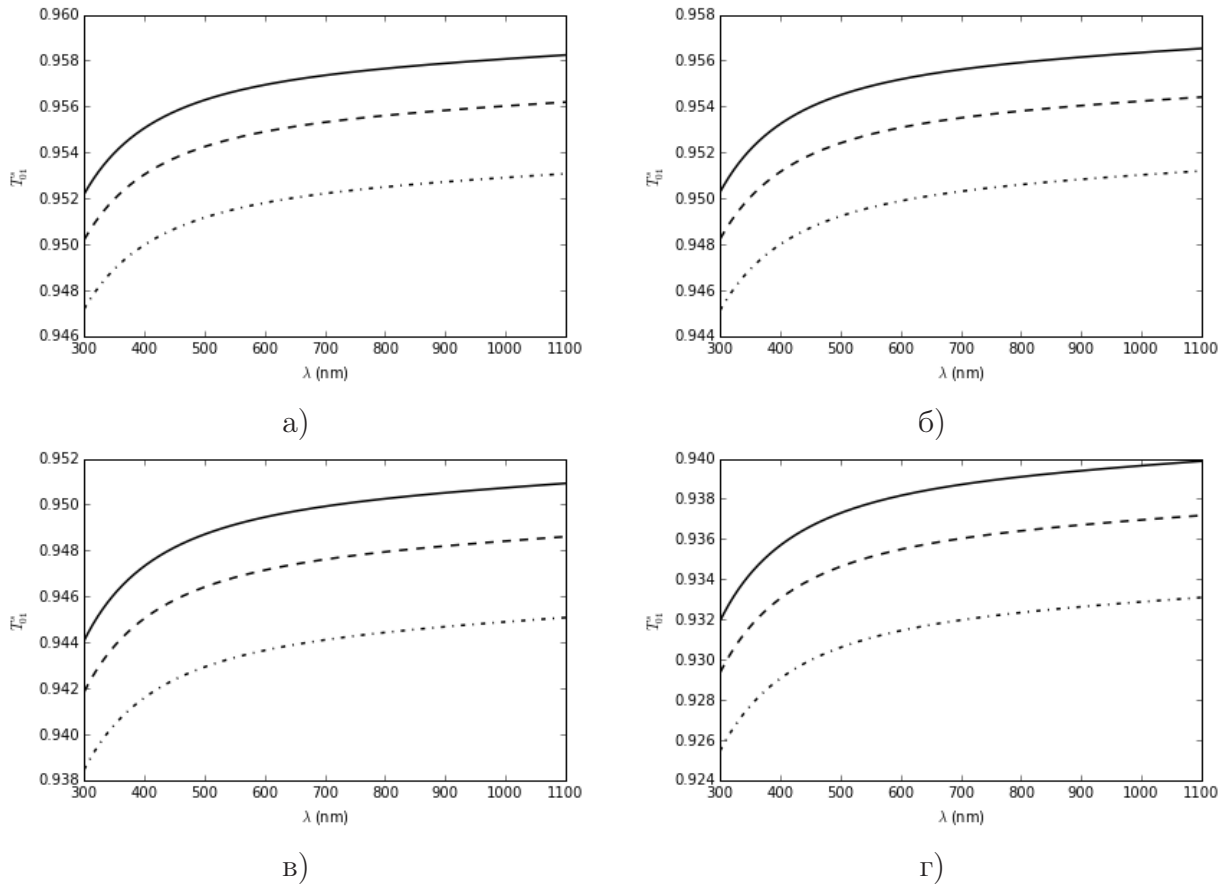


Рис. 6. Зависимости энергетических коэффициентов оптического пропускания от длины волны излучения для случая падения s -поляризованной оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокомпозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 0^\circ$, б) $\theta_0 = 10^\circ$, в) $\theta_0 = 20^\circ$, г) $\theta_0 = 30^\circ$.

для серебра скорость Ферми равна $v_F = 1.39 \cdot 10^6$ м/с.

Для объёмного серебра известны следующие параметры: $\varepsilon_{\infty 1} = 4.1$, $\omega_p = 1.33 \cdot 10^{16}$ с⁻¹, $\gamma_{01} = 7.7 \cdot 10^{13}$ с⁻¹.

Рассмотрим нанокомпозитную плёнку, состоящую из полимерной матрицы и включений в виде сферических наночастиц серебра. Для того чтобы оценить соотношение оптических констант компонент нанокомпозитной среды, воспользуемся теорией Максвелл–Гарнетта. Согласно этой теории может быть найдена эффективная диэлектрическая проницаемость двухкомпонентной гетерогенной среды.

Применим модель эффективной среды для описания двух нанокомпозитных сред. Эффективная диэлектрическая проницаемость среды j вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_j = \varepsilon_j^m \left(1 + \frac{f_j (\varepsilon_j^p - \varepsilon_j^m)}{\varepsilon_j^m + g_j (1 - f_j) (\varepsilon_j^p - \varepsilon_j^m)} \right). \quad (32)$$

где ε_j^m — диэлектрическая проницаемость матрицы в среде j , ε_j^p — диэлектрическая проницаемость наночастиц серебра в среде j , f_j — объёмная доля включений в среде j , g_j — деполаризующий фактор. В случае сферических наночастиц деполаризующий фактор $g_j = 1/3$. Эффективная диэлектрическая проницаемость наночастиц в среде j

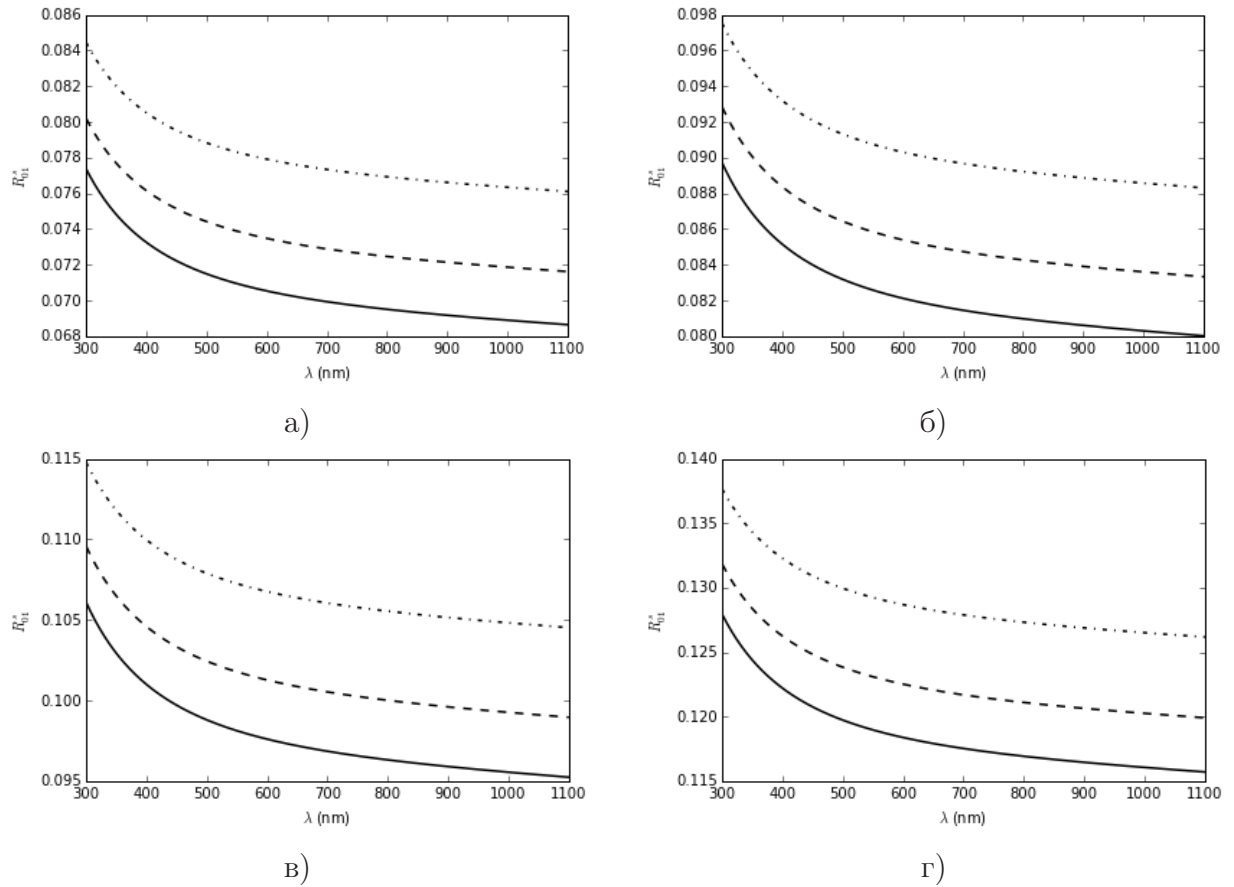


Рис. 7. Зависимости энергетических коэффициентов оптического отражения от длины волны оптического излучения для случая падения s -поляризованной оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокомпозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 35^\circ$, б) $\theta_0 = 40^\circ$, в) $\theta_0 = 45^\circ$, г) $\theta_0 = 50^\circ$.

имеет вид:

$$\varepsilon_{jp}(\omega) = 1 - \frac{\omega_{jp}^2 - \omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\omega\gamma_{ej}}. \quad (33)$$

где введено обозначение

$$\gamma_{ej} = \gamma_{0j} + (0.71 + (1 - f_j) 0.31) \frac{v_{Fj}}{a_j}, \quad (34)$$

где v_{Fj} – скорость Ферми для металлических наночастиц, a_j – радиус металлических наночастиц в нанокомпозитной среде j .

Рассмотрим результаты численных расчётов энергетических коэффициентов оптического пропускания однослойной нанокомпозитной плёнки с наночастицами серебра, расположенной на подложке из стекла типа ВК7.

На рис. 9 изображены зависимости графики зависимостей действительной и мнимой частей эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

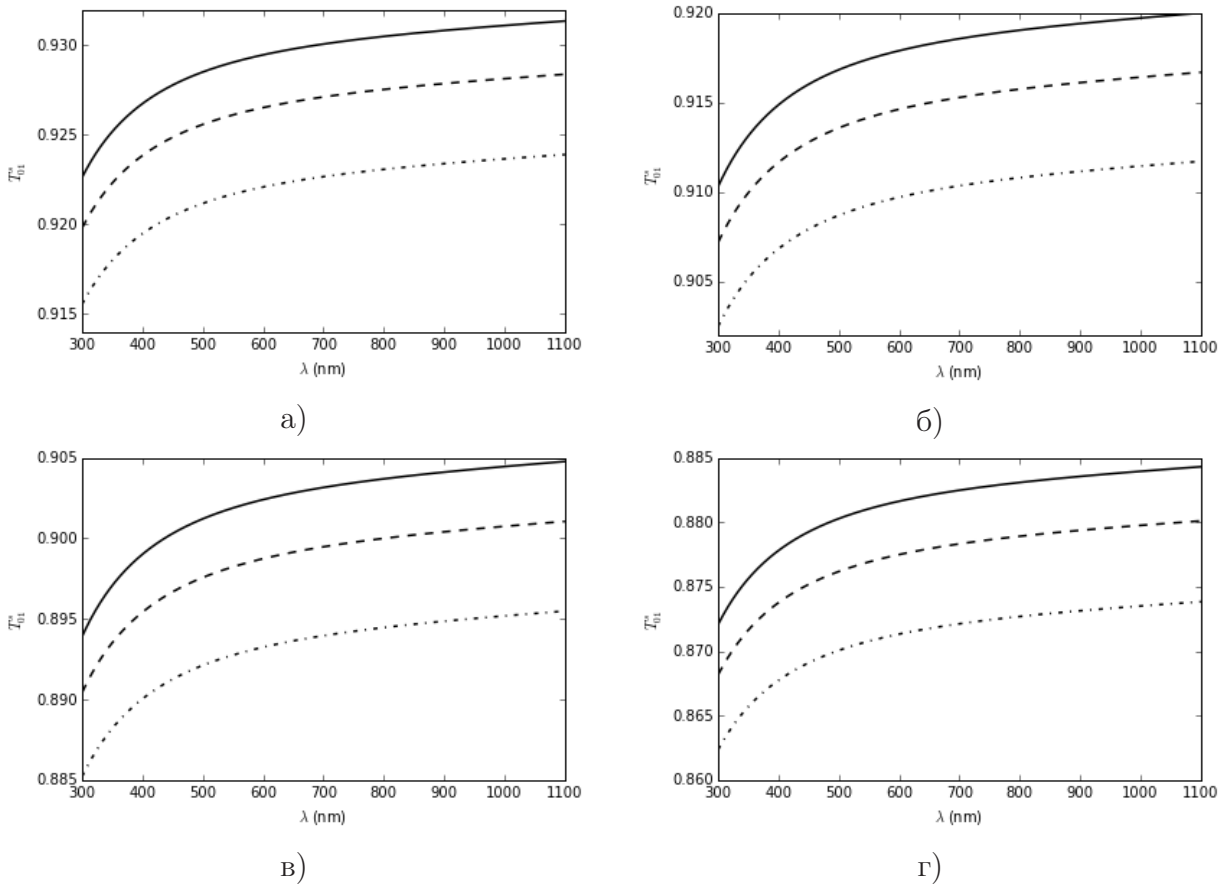


Рис. 8. Зависимости энергетических коэффициентов оптического пропускания от длины волны излучения для случая падения s -поляризованной оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокомпозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 35^\circ$, б) $\theta_0 = 40^\circ$, в) $\theta_0 = 45^\circ$, г) $\theta_0 = 50^\circ$.

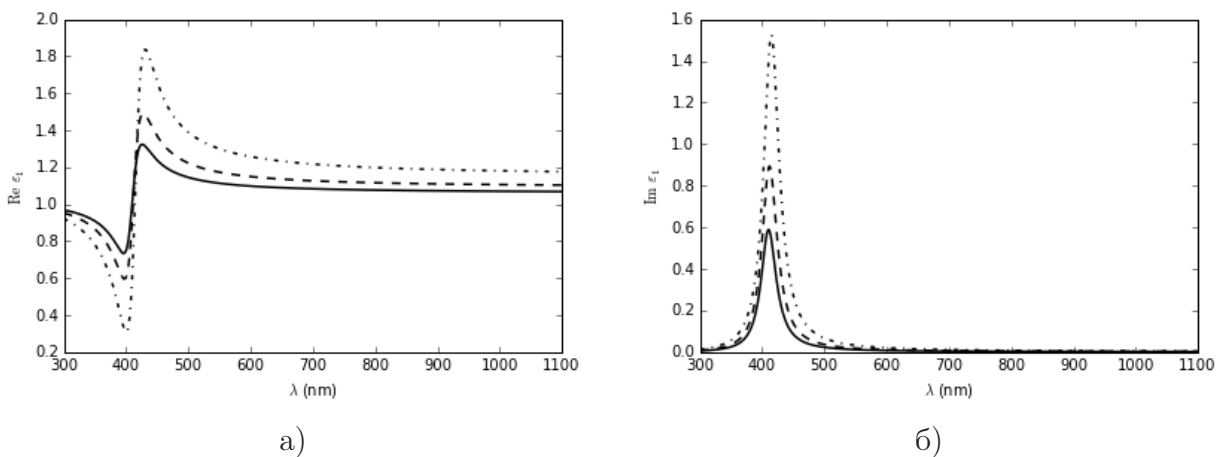


Рис. 9. Графики зависимостей действительной и мнимой частей эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

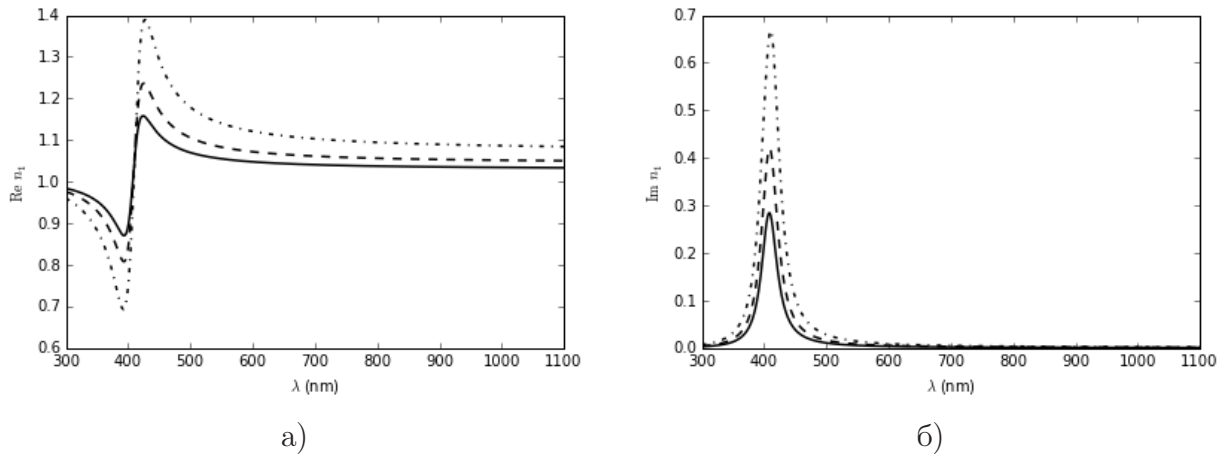


Рис. 10. Графики зависимостей модуля эффективной диэлектрической проницаемости и модуля эффективного показателя преломления нанокompозита из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

На рис. 10 изображены зависимости графики зависимостей модуля эффективной диэлектрической проницаемости и модуля эффективного показателя преломления нанокompозита из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

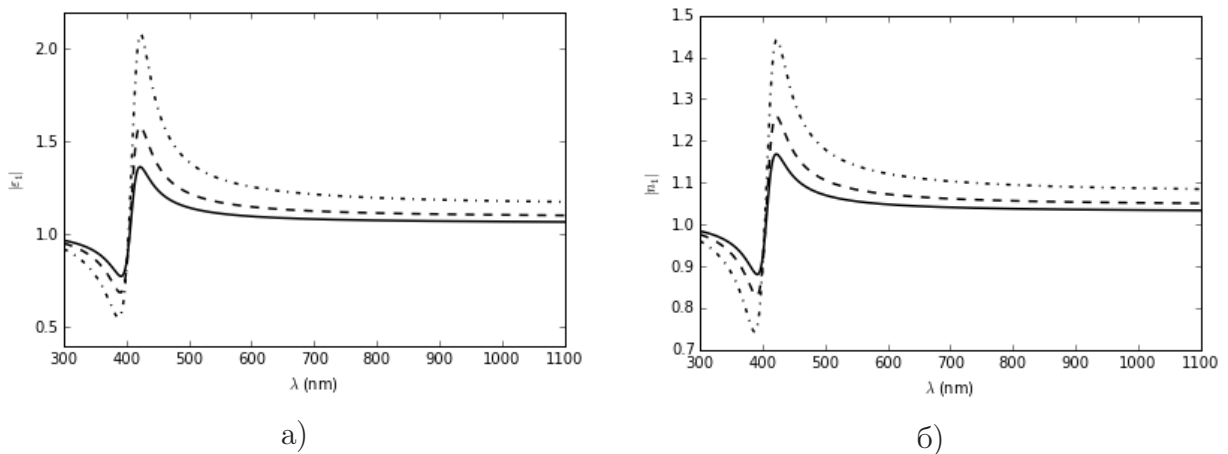


Рис. 11. Графики зависимостей действительной и мнимой частей эффективного показателя преломления нанокompозита из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

На рис. 11 изображены зависимости графики зависимостей действительной и мнимой частей эффективного показателя преломления нанокompозита из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

На рис. 12 приведено изображение графиков зависимости квадрата модуля эффективного показателя преломления нанокompозита из полиметилметакрилата с наноча-

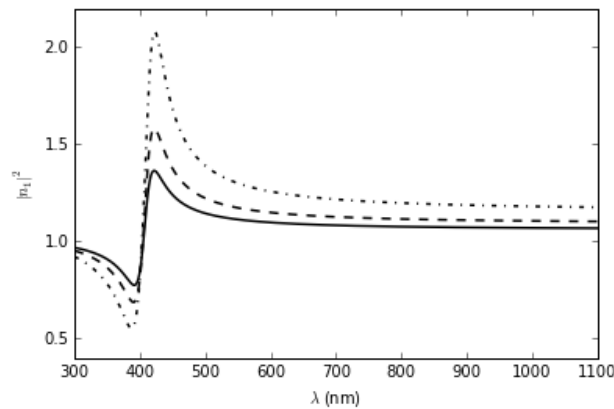


Рис. 12. Графики зависимости квадрата модуля эффективного показателя преломления нанокompозита из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

стицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения.

На рис. 13 изображены зависимости энергетических коэффициентов оптического отражения от длины волны оптического излучения для случая падения s -поляризованной оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокompозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 0^\circ$, б) $\theta_0 = 10^\circ$, в) $\theta_0 = 20^\circ$, г) $\theta_0 = 30^\circ$.

На рис. 14 изображены зависимости энергетических коэффициентов оптического пропускания от длины волны внешнего оптического излучения для случая падения s -поляризованной оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокompозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 0^\circ$, б) $\theta_0 = 10^\circ$, в) $\theta_0 = 20^\circ$, г) $\theta_0 = 30^\circ$.

На рис. 15 изображены зависимости энергетических коэффициентов оптического отражения от длины волны внешнего оптического излучения для случая падения s -поляризованной оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокompозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 35^\circ$, б) $\theta_0 = 40^\circ$, в) $\theta_0 = 45^\circ$, г) $\theta_0 = 50^\circ$.

На рис. 16 изображены зависимости энергетических коэффициентов оптического пропускания от длины волны внешнего оптического излучения для случая падения s -поляризованной оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокompозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического из-

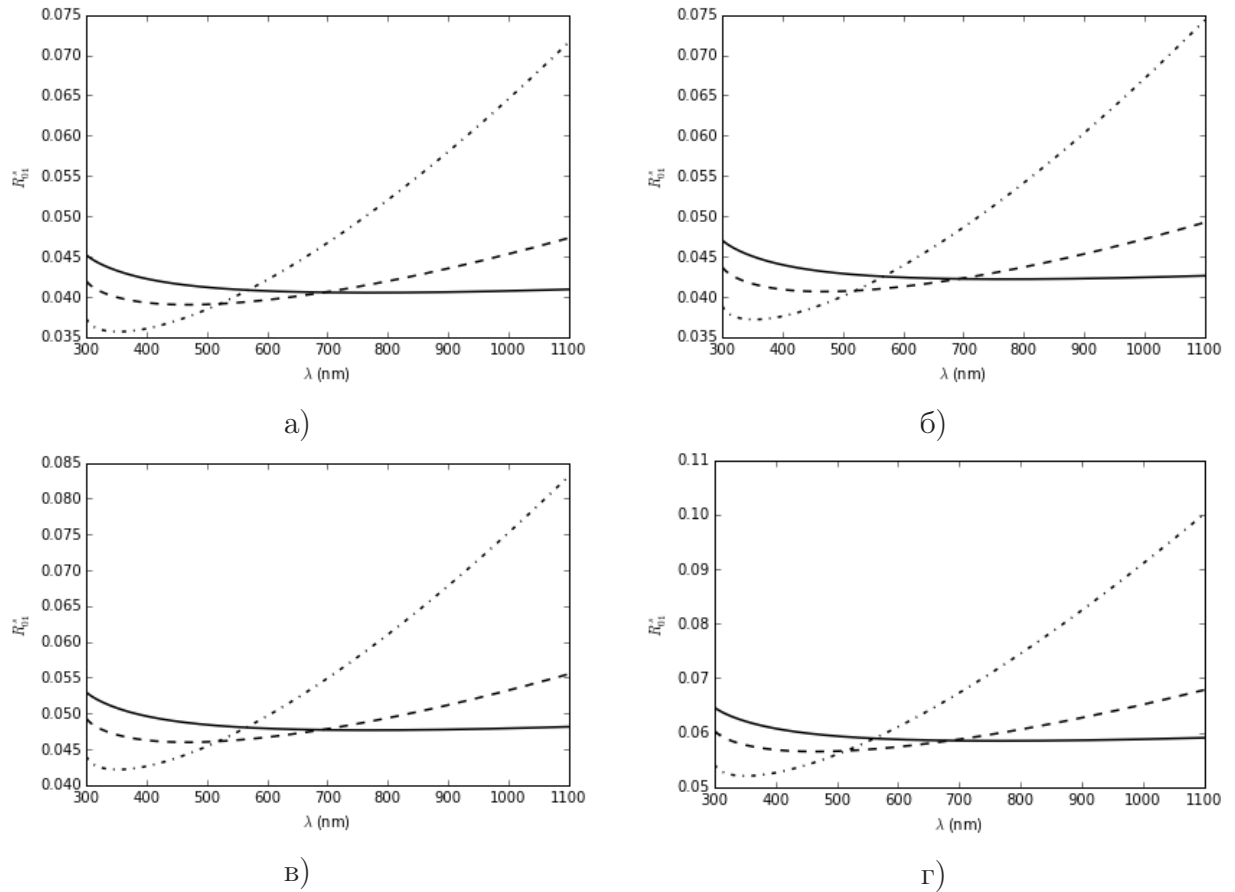


Рис. 13. Зависимости энергетических коэффициентов оптического отражения от длины волны оптического излучения для случая падения s -поляризованной оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокомпозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 0^\circ$, б) $\theta_0 = 10^\circ$, в) $\theta_0 = 20^\circ$, г) $\theta_0 = 30^\circ$.

лучения, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 35^\circ$, б) $\theta_0 = 40^\circ$, в) $\theta_0 = 45^\circ$, г) $\theta_0 = 50^\circ$.

Компьютерная программа для вычисления коэффициентов оптического отражения и пропускания состоит из блока подключения всех необходимых модулей для численных вычислений и построения графиков, блока описания констант, блока описания или ввода параметров, блока описания функций и процедур для вычисления оптических параметров, амплитудных и энергетических коэффициентов, блока построения графиков, блока записи графиков в файл.

В зависимости от типа основной матрицы, занимающей большую часть объёма нанокомпозитного материала, нанокомпозиты принято подразделять на три категории. Нанокомпозиты на основе керамической матрицы улучшают оптические и электрические свойства первоначального материала (керамического соединения, состоящего из смеси оксидов, нитридов, силицидов и т.д.). В нанокомпозитах на основе металлической матрицы так называемым усиливающим материалом (нанокомпонентом) часто служат углеродные нанотрубки, повышающие прочность и электрическую проводимость. Полимерные нанокомпозиты содержат полимерную матрицу с распределёнными по ней наночастицами или нанонаполнителями различной структуры.

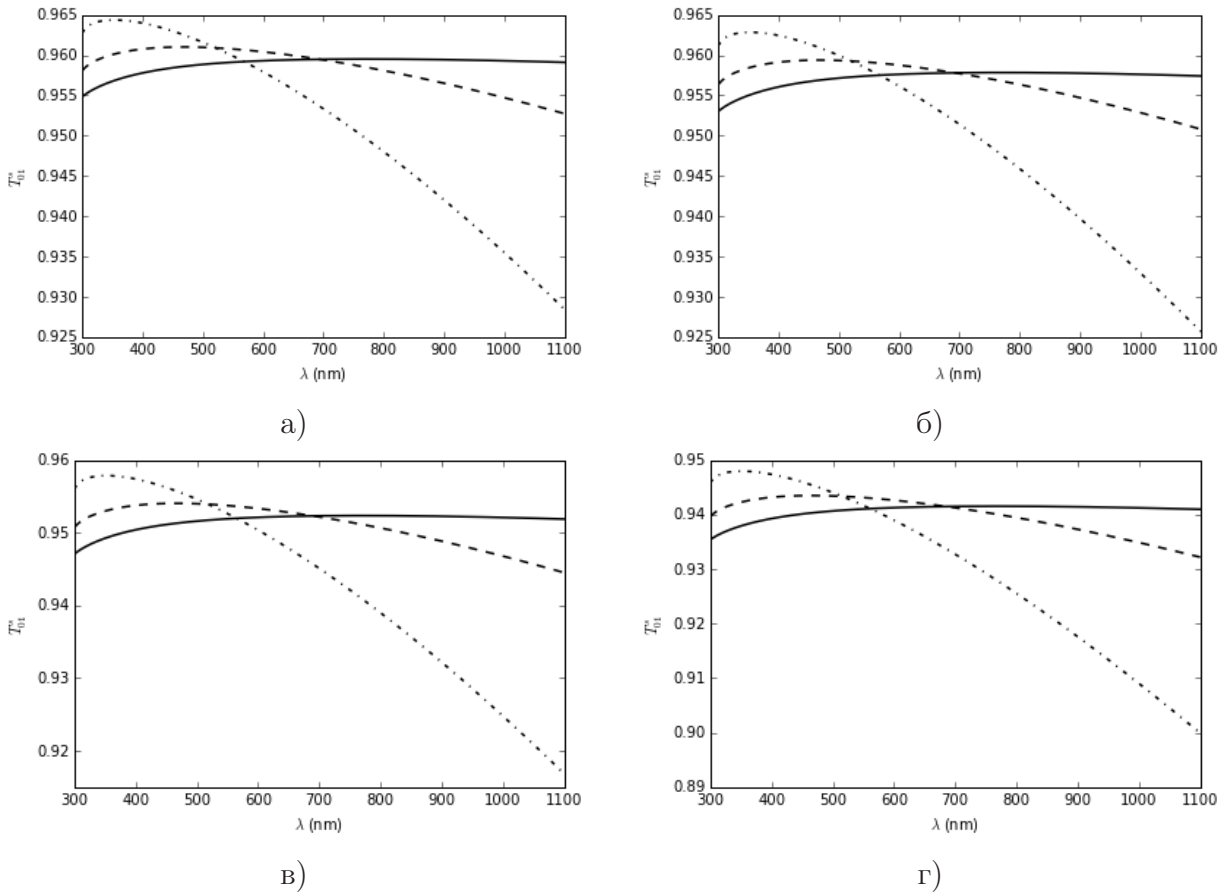


Рис. 14. Зависимости энергетических коэффициентов оптического пропускания от длины волны излучения для случая падения s -поляризованной оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокомпозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 0^\circ$, б) $\theta_0 = 10^\circ$, в) $\theta_0 = 20^\circ$, г) $\theta_0 = 30^\circ$.

Заключение

В работе исследованы оптические характеристики нанокомпозитов. В работе проводились численные расчёты пропускательной и отражательной способностей нанокомпозитных плёнок, находящихся во внешнем поле оптического излучения.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. проведённый анализ литературы по физике нанокомпозитов показал актуальность исследования физических свойств нанокомпозитов,
2. построена теоретическая модель, пригодная для адекватного описания оптических процессов в нанокомпозитных плёнках с металлическими наночастицами, находящихся в поле оптического излучения,
3. компьютерная программа, которая была написана на языке программирования Python, позволяет вычислять оптические характеристики нанокомпозитных сред, строить графики зависимостей отражательной и пропускательной способностей от длины волны оптического излучения,
4. в результате численных расчётов оптических характеристик нанокомпозитных сред показано, что возможно управлять значением оптического пропускания нанокомпозитной среды, изменяя состав нанокомпозита.

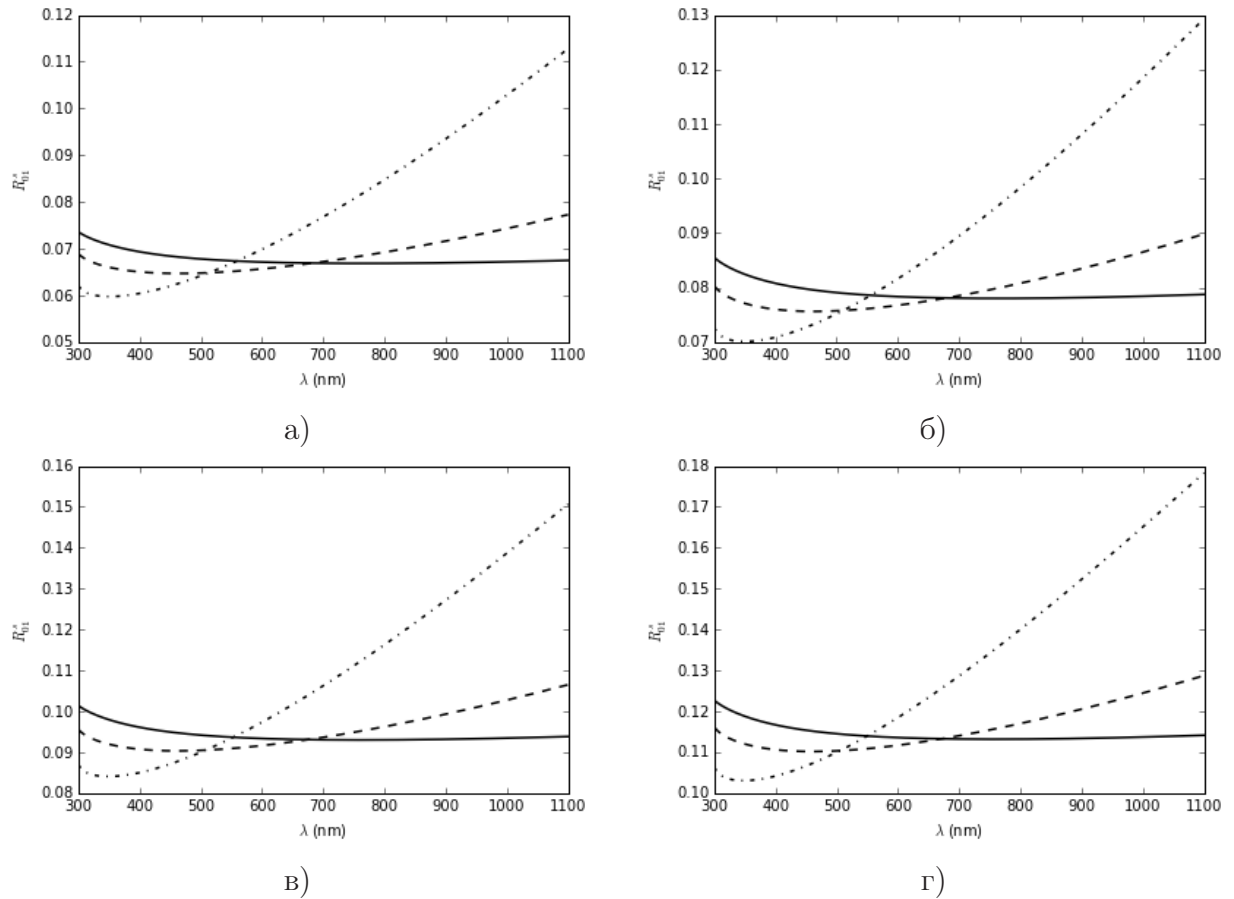


Рис. 15. Зависимости энергетических коэффициентов оптического отражения от длины волны оптического излучения для случая падения s -поляризованной оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокompозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения, расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 35^\circ$, б) $\theta_0 = 40^\circ$, в) $\theta_0 = 45^\circ$, г) $\theta_0 = 50^\circ$.

Для вычисления оптических характеристик нанокompозитных сред с металлическими наночастицами составлена компьютерная программа на языке программирования Python. Компьютерная программа позволяет строить графики зависимостей отражательной и пропускательной способностей нанокompозитных плёнок от длины волны внешнего оптического излучения. Компьютерная программа для вычисления энергетических коэффициентов оптического отражения и пропускания прозрачных нанокompозитных сред состоит из блока подключения всех необходимых модулей для численных вычислений и построения графиков, блока описания констант, блока описания или ввода параметров, блока описания функций и процедур для вычисления оптических параметров, амплитудных и энергетических коэффициентов, блока построения графиков, блока записи графиков в файл, блока отображения графиков в окне программы.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если использовать современные методы анализа физических свойств наноструктур с металлическими наночастицами, то можно прогнозировать состояния нанокompозитных сред с металлическими наночастицами в составе более сложных наноструктур в наноразмерных оптоэлектронных приборах и устройствах нанoeлектроники на основе нанокompозитных сред с металлическими наночастицами, подтверждена полностью.

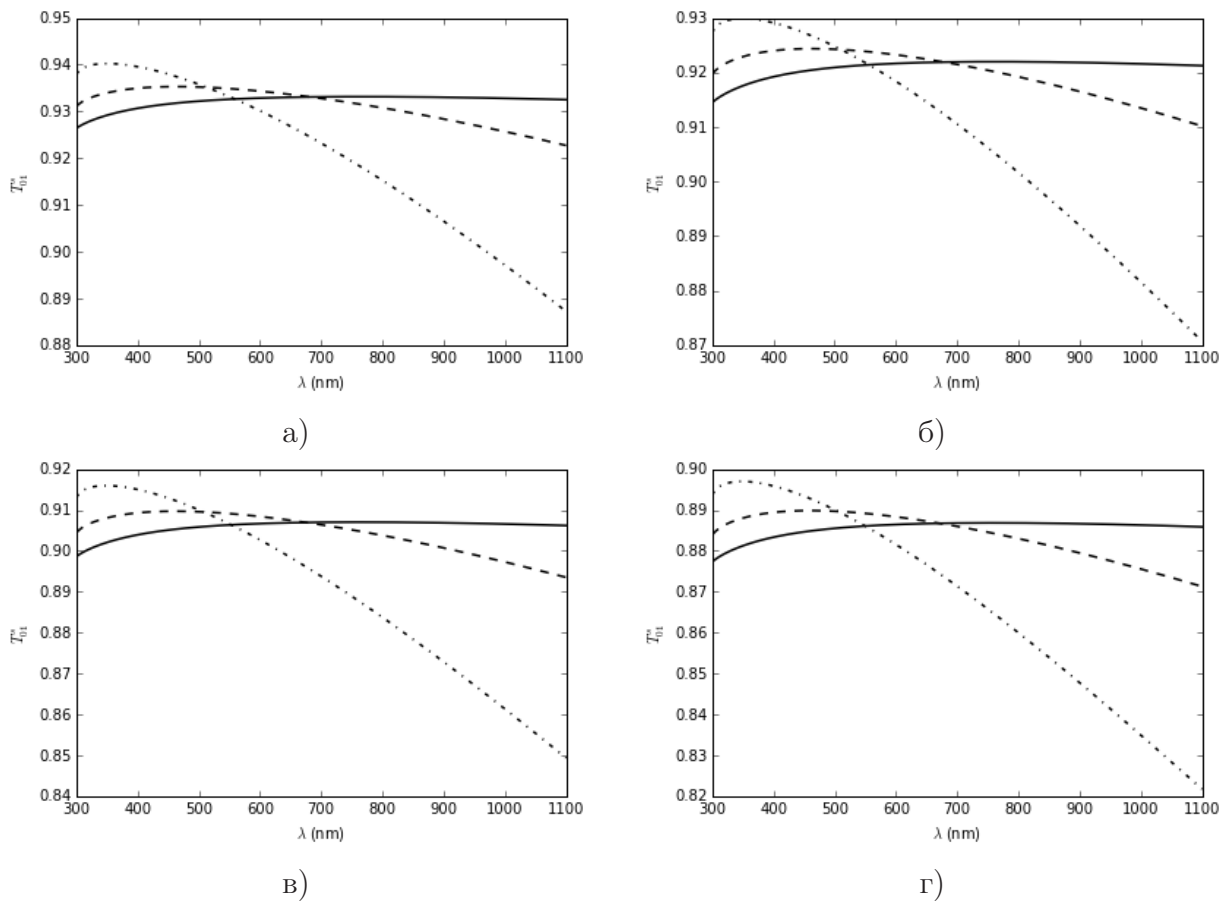


Рис. 16. Зависимости энергетических коэффициентов оптического пропускания от длины волны излучения для случая падения s -поляризованной оптической волны из воздуха на границу раздела с полубесконечной нанокompозитной средой из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с фактором заполнения $f_1 = 2\%$ (для сплошной линии), $f_1 = 3\%$ (для пунктирной линии), $f_1 = 5\%$ (для штрих-пунктирной линии) от длины волны внешнего оптического излучения, расположенную на подложке из стекла BK7 при угле падения излучения а) $\theta_0 = 35^\circ$, б) $\theta_0 = 40^\circ$, в) $\theta_0 = 45^\circ$, г) $\theta_0 = 50^\circ$.

Именно металл-полимерные нанокompозиты особенно востребованы в последнее время, потому было предложено много различных вариантов наноструктурных наполнителей, усиливающих и изменяющих свойства полимеров. В качестве матрицы в этом виде нанокompозитов применяют полипропилен, полистирол, полиамид или нейлон, а нанокompонентами выступают частицы оксидов алюминия или титана, либо углеродные, а также кремниевые нанотрубки и волокна. Нанокompозиты на основе полимеров отличаются от обычных полимерных композитных материалов меньшим весом и при этом большей ударопрочностью и износостойкостью, а также хорошим сопротивлением химическим воздействиям, что позволяет использовать их в военных и аэрокосмических разработках. Главное условие для создания полимерного нанокompозита с необходимыми свойствами заключается в полной совместимости основного материала и добавляемых к нему наночастиц, однако не менее важно для конечного результата правильно распределить наночастицы в полимерной матрице нанокompозитной плёнки.

Нанокompозитные плёнки с наночастицами серебра могут быть использованы для создания высокоэффективных просветляющих покрытий для солнечных панелей.

Список использованных источников

1. Lateral photovoltaic effect in silk-protein-based nanocomposite structure for physically transient position-sensitive detectors / Yuhong Cao [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2021. — may. — Vol. 15, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.15.054011>.
2. A physically transient form of silicon electronics / Suk-Won Hwang [et al.] // *Science*. — 2012. — sep. — Vol. 337, no. 6102. — P. 1640–1644. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1226325>.
3. Dissolvable metals for transient electronics / Lan Yin [et al.] // *Advanced Functional Materials*. — 2013. — sep. — Vol. 24, no. 5. — P. 645–658. — URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.201301847>.
4. Biodegradable thin metal foils and spin-on glass materials for transient electronics / Seung-Kyun Kang [et al.] // *Advanced Functional Materials*. — 2015. — jan. — Vol. 25, no. 12. — P. 1789–1797. — URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.201403469>.
5. Novel eco-friendly starch paper for use in flexible, transparent, and disposable organic electronics / Heejeong Jeong [et al.] // *Advanced Functional Materials*. — 2017. — nov. — Vol. 28, no. 3. — P. 1704433. — URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.201704433>.
6. Ultrahigh tough, super clear, and highly anisotropic nanofiber-structured regenerated cellulose films / Dongdong Ye [et al.] // *ACS Nano*. — 2019. — apr. — Vol. 13, no. 4. — P. 4843–4853. — URL: <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b02081>.
7. Dissolvable films of silk fibroin for ultrathin conformal bio-integrated electronics / Dae-Hyeong Kim [et al.] // *Nature Materials*. — 2010. — apr. — Vol. 9, no. 6. — P. 511–517. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat2745>.
8. Precisely printable and biocompatible silk fibroin bioink for digital light processing 3D printing / Soon Hee Kim [et al.] // *Nature Communications*. — 2018. — apr. — Vol. 9, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03759-y>.
9. Materials and fabrication processes for transient and bioresorbable high-performance electronics / Suk-Won Hwang [et al.] // *Advanced Functional Materials*. — 2013. — apr. — Vol. 23, no. 33. — P. 4087–4093. — URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.201300127>.
10. Physically transient resistive switching memory based on silk protein / Hong Wang [et al.] // *Small*. — 2016. — mar. — Vol. 12, no. 20. — P. 2715–2719. — URL: <https://doi.org/10.1002/smll.201502906>.
11. Silk inverse opals / Sunghwan Kim [et al.] // *Nature Photonics*. — 2012. — nov. — Vol. 6, no. 12. — P. 818–823. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.264>.
12. Garanin Dmitry A., Chudnovsky Eugene M. Nonlinear and thermal effects in the absorption of microwaves by random magnets // *Physical Review B*. — 2022. — feb. — Vol. 105, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.105.064402>.
13. Stability and equation of state of a nanocrystalline Ga-Ge mullite in a vitroc ceramic composite: A synchrotron X-ray diffraction study / Kristina E. Lipinska-Kalita [et al.] // *Physical Review B*. — 2008. — apr. — Vol. 77, no. 13. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.77.134107>.


14. Analysis and fabrication of antireflective coating for photovoltaics based on a photonic-crystal concept and generated by evolutionary optimization / Pauline Bennet [et al.] // *Physical Review B*. — 2021. — mar. — Vol. 103, no. 12. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.103.125135>.
15. Cavity Enhancement of Anti-Stokes Scattering via Optomechanical Coupling with Surface Acoustic Waves / Ayato Okada [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2018. — aug. — Vol. 10, no. 2. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.10.024002>.
16. Aspelmeyer Markus, Kippenberg Tobias J., Marquardt Florian. Cavity optomechanics // *Reviews of Modern Physics*. — 2014. — dec. — Vol. 86, no. 4. — P. 1391–1452. — URL: <https://doi.org/10.1103/revmodphys.86.1391>.
17. Sideband cooling of micromechanical motion to the quantum ground state / J. D. Teufel [et al.] // *Nature*. — 2011. — jul. — Vol. 475, no. 7356. — P. 359–363. — URL: <https://doi.org/10.1038/nature10261>.
18. Laser cooling of a nanomechanical oscillator into its quantum ground state / Jasper Chan [et al.] // *Nature*. — 2011. — oct. — Vol. 478, no. 7367. — P. 89–92. — URL: <https://doi.org/10.1038/nature10461>.
19. Bose S., Jacobs K., Knight P. L. Preparation of nonclassical states in cavities with a moving mirror // *Physical Review A*. — 1997. — nov. — Vol. 56, no. 5. — P. 4175–4186. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.56.4175>.
20. Nanomechanical coupling between microwave and optical photons / Joerg Bochmann [et al.] // *Nature Physics*. — 2013. — sep. — Vol. 9, no. 11. — P. 712–716. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphys2748>.
21. Near-field effect in composite nanomaterials with a quasi-zero refractive index / O. N. Gadomsky [et al.] // *Optics Communications*. — 2014. — mar. — Vol. 315. — P. 286–294. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2013.11.035>.
22. Altunin K. K., Gadomsky O. N. High-negative effective refractive index of silver nanoparticles system in nanocomposite films // *Optics Communications*. — 2012. — mar. — Vol. 285, no. 5. — P. 816–820. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2011.11.033>.

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

IstinaResearcherID  66185348

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


E-mail: zheleznikovaliza200@gmail.com

ORCID iD  0000-0002-5854-1366

Web of Science ResearcherID  AGV-8100-2022

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

E-mail: sokolovavasilevna2002@inbox.ru

ORCID iD  0000-0003-3479-119X

Web of Science ResearcherID  AGV-8078-2022

Original article
PACS 42.25.Bs
OCIS 310.6860
MSC 00A79

Investigation of optical reflection and transmission of a nanocomposite structure with metal nanoparticles

K. K. Altunin , E. S. Zheleznikova , V. V. Sokolova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted October 5, 2023
Resubmitted October 12, 2023
Published December 12, 2023

Abstract. The optical reflection and transmission of a nanocomposite structure with metal nanoparticles located in an optical radiation field is considered. The results of numerical calculations of the energy coefficients of optical reflection and transmission from the surface of a nanocomposite film with silver nanoparticles at different angles of incidence of radiation on the surface of the nanocomposite film are presented.

Keywords: optical transmission, optical reflection, optical radiation, nanocomposite, nanostructure, nanoparticle, silver nanoparticles

References

1. Lateral photovoltaic effect in silk-protein-based nanocomposite structure for physically transient position-sensitive detectors / Yuhong Cao [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2021. — may. — Vol. 15, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.15.054011>.
2. A physically transient form of silicon electronics / Suk-Won Hwang [et al.] // *Science*. — 2012. — sep. — Vol. 337, no. 6102. — P. 1640–1644. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1226325>.
3. Dissolvable metals for transient electronics / Lan Yin [et al.] // *Advanced Functional Materials*. — 2013. — sep. — Vol. 24, no. 5. — P. 645–658. — URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.201301847>.
4. Biodegradable thin metal foils and spin-on glass materials for transient electronics / Seung-Kyun Kang [et al.] // *Advanced Functional Materials*. — 2015. — jan. — Vol. 25, no. 12. — P. 1789–1797. — URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.201403469>.
5. Novel eco-friendly starch paper for use in flexible, transparent, and disposable organic electronics / Heejeong Jeong [et al.] // *Advanced Functional Materials*. — 2017. — nov. — Vol. 28, no. 3. — P. 1704433. — URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.201704433>.
6. Ultrahigh tough, super clear, and highly anisotropic nanofiber-structured regenerated cellulose Films / Dongdong Ye [et al.] // *ACS Nano*. — 2019. — apr. — Vol. 13, no. 4. — P. 4843–4853. — URL: <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b02081>.

7. Dissolvable films of silk fibroin for ultrathin conformal bio-integrated electronics / Dae-Hyeong Kim [et al.] // *Nature Materials*. — 2010. — apr. — Vol. 9, no. 6. — P. 511–517. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat2745>.
8. Precisely printable and biocompatible silk fibroin bioink for digital light processing 3D printing / Soon Hee Kim [et al.] // *Nature Communications*. — 2018. — apr. — Vol. 9, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03759-y>.
9. Materials and fabrication processes for transient and bioresorbable high-performance electronics / Suk-Won Hwang [et al.] // *Advanced Functional Materials*. — 2013. — apr. — Vol. 23, no. 33. — P. 4087–4093. — URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.201300127>.
10. Physically transient resistive switching memory based on silk protein / Hong Wang [et al.] // *Small*. — 2016. — mar. — Vol. 12, no. 20. — P. 2715–2719. — URL: <https://doi.org/10.1002/smll.201502906>.
11. Silk inverse opals / Sunghwan Kim [et al.] // *Nature Photonics*. — 2012. — nov. — Vol. 6, no. 12. — P. 818–823. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.264>.
12. Garanin Dmitry A., Chudnovsky Eugene M. Nonlinear and thermal effects in the absorption of microwaves by random magnets // *Physical Review B*. — 2022. — feb. — Vol. 105, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.105.064402>.
13. Stability and equation of state of a nanocrystalline Ga-Ge mullite in a vitroc ceramic composite: A synchrotron x-ray diffraction study / Kristina E. Lipinska-Kalita [et al.] // *Physical Review B*. — 2008. — apr. — Vol. 77, no. 13. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.77.134107>.
14. Analysis and fabrication of antireflective coating for photovoltaics based on a photonic-crystal concept and generated by evolutionary optimization / Pauline Bennet [et al.] // *Physical Review B*. — 2021. — mar. — Vol. 103, no. 12. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.103.125135>.
15. Cavity Enhancement of Anti-Stokes Scattering via Optomechanical Coupling with Surface Acoustic Waves / Ayato Okada [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2018. — aug. — Vol. 10, no. 2. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.10.024002>.
16. Aspelmeyer Markus, Kippenberg Tobias J., Marquardt Florian. Cavity optomechanics // *Reviews of Modern Physics*. — 2014. — dec. — Vol. 86, no. 4. — P. 1391–1452. — URL: <https://doi.org/10.1103/revmodphys.86.1391>.
17. Sideband cooling of micromechanical motion to the quantum ground state / J. D. Teufel [et al.] // *Nature*. — 2011. — jul. — Vol. 475, no. 7356. — P. 359–363. — URL: <https://doi.org/10.1038/nature10261>.
18. Laser cooling of a nanomechanical oscillator into its quantum ground state / Jasper Chan [et al.] // *Nature*. — 2011. — oct. — Vol. 478, no. 7367. — P. 89–92. — URL: <https://doi.org/10.1038/nature10461>.
19. Bose S., Jacobs K., Knight P. L. Preparation of nonclassical states in cavities with a moving mirror // *Physical Review A*. — 1997. — nov. — Vol. 56, no. 5. — P. 4175–4186. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.56.4175>.

20. Nanomechanical coupling between microwave and optical photons / Joerg Bochmann [et al.] // Nature Physics. — 2013. — sep. — Vol. 9, no. 11. — P. 712–716. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphys2748>.
21. Near-field effect in composite nanomaterials with a quasi-zero refractive index / O. N. Gadomsky [et al.] // Optics Communications. — 2014. — mar. — Vol. 315. — P. 286–294. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2013.11.035>.
22. Altunin K. K., Gadomsky O. N. High-negative effective refractive index of silver nanoparticles system in nanocomposite films // Optics Communications. — 2012. — mar. — Vol. 285, no. 5. — P. 816–820. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2011.11.033>.

Information about authors:

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

E-mail: kostya.altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

IstinaResearcherID  66185348

Elizaveta Sergeevna Zheleznikova — 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: zheleznikovaliza200@gmail.com

ORCID iD  0000-0002-5854-1366

Web of Science ResearcherID  AGV-8100-2022

Veronika Vasilievna Sokolova — 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: sokolovavasilevna2002@inbox.ru

ORCID iD  0000-0003-3479-119X

Web of Science ResearcherID  AGV-8078-2022

Научная статья
УДК 535.3
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 1.3.6.
PACS 42.25.Bs
OCIS 310.6628
MSC 00A79

Нелокальные полевые уравнения в наноструктурах с учётом высших мультипольных моментов

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 27 ноября 2023 года

После переработки 30 ноября 2023 года

Опубликована 12 декабря 2023 года

Аннотация. Предложены нелокальные полевые уравнения для описания распространения оптических волн в наноструктурах с учётом высших мультипольных моментов для различных типов разрешённых квантовых переходов. Учёт различных типов квантовых переходов высшей мультипольности в спектре взаимодействующих атомов наноструктурной среды может существенно улучшить точность описания оптических явлений в наноструктурных средах при помощи нелокальных полевых уравнений.

Ключевые слова: наноструктурная среда, электрические дипольные переходы, электрические квадрупольные переходы, магнитные дипольные переходы, нелокальные уравнения, полевые уравнения, макроскопические поля, микроскопические поля

Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки более точных теоретических и численных методов описания оптических свойств наноструктурных сред в поле внешней оптической волны для их дальнейшего использования в процессе проектирования новых приборов и устройств оптоэлектроники. Учёт различных типов квантовых переходов высшей мультипольности в спектре взаимодействующих атомов наноструктурной среды может существенно улучшить точность описания оптических явлений в наноструктурных средах при помощи нелокальных полевых уравнений.

Целью работы является исследование возможностей применения нелокальных полевых уравнений для описания свойств наноструктур с учётом высших мультипольных моментов и различных типов квантовых переходов в спектре взаимодействующих атомов наноструктурной среды.

¹E-mail: kostya_altunin@mail.ru

Задачи исследования включают в себя разработку системы нелокальных полевых уравнений для описания взаимодействия оптической волны с атомами наноструктурной среды с учётом различных типов квантовых переходов в спектрах атомов наноструктурной среды, а также исследование влияния высших мультипольных моментов на оптические свойства наноструктурных сред.

Гипотезой исследования состоит в том, что если использовать нелокальные полевые уравнения с учётом различных типов квантовых переходов высшей мультипольности, то можно улучшить точность описания оптических свойств наноструктур по сравнению с локальными моделями классической электродинамики.

Научная новизна исследования состоит в том, что впервые предложена система нелокальных полевых уравнений для описания оптических процессов в наноструктурных средах с учётом различных типов квантовых переходов определённой мультипольности в спектре атомов наноструктурной среды.

В качестве метода исследования используется теоретический анализ нелокальных полевых уравнений с учётом различных типов квантовых переходов в атомах наноструктурной среды для описания свойств наноструктур в поле внешнего оптического излучения. В качестве материалов исследования используются теоретические модели наноструктур, основанные на нелокальных полевых уравнениях, для описания оптических процессов в наноструктурных средах.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что полученные нелокальные полевые уравнения для наноструктурных сред с учётом различных типов квантовых переходов в атомах наноструктурной среды могут быть использованы для создания новых теоретических моделей наноструктурных сред, которые будут более точными и эффективными, чем существующие модели. Нелокальные нелокальные полевые уравнения для наноструктурных сред позволяют учитывать эффекты, которые не учитываются в традиционных моделях классической электродинамики, такие как эффект локального поля и эффект ближнего поля для наноструктурных сред. Практическая значимость исследования заключается в том, что результаты исследования нелокальных полевых уравнений для наноструктурных сред могут быть использованы для разработки новых методов описания наноматериалов и наноструктур с заданными физическими свойствами для различных приложений в оптоэлектронике, таких как фотовольтаика, наносенсорика и наноплазмоника.

Обзор

В статье [1] исследуется оптическая спиральность, оптический спин в теории электромагнетизма и показано, что эти сохраняющиеся величины можно объединить, чтобы сформировать новое описание углового момента, связанного с оптической поляризацией: описание, аналогичное знакомому описанию с использованием оптической энергии и линейного импульса. В статье [1] представлены и обсуждаются симметрии уравнений Максвелла, лежащие в основе сохранения наших величин. В статье [1] объясняется, что аналогичный, но отличный набор величин в модели Липкина, описывает момент импульса вихря электромагнитного поля, а не момент импульса самого электромагнитного поля.

В статье [2] показано, что если оптическое уравнение Дирака интерпретировать как динамическое уравнение для фотона в традиционной квантовой механике, волновая функция, называемая полем фотона, действительно преобразуется при преобразовании Лоренца как спинор. Однако для того, чтобы оптическое уравнение Дирака было лоренц-ковариантным, необходимо ограничение на поле фотонов, которое можно представить в форме уравнений дивергенции Максвелла. В статье [2] обнаружено, что спинорное поле фотонов не только удовлетворяет принципу локальности, но и имеет

правильную размерность, как того требует традиционная квантовая механика.

Двойная симметрия между электрическим и магнитным полями является важным внутренним свойством уравнений Максвелла в свободном пространстве. В статье [3] показано, что эта симметрия лежит в основе сохранения оптической спиральности и тесно связана с разделением спиновых и орбитальных степеней свободы света (поток спиральности совпадает со спиновым моментом). Однако в стандартной формулировке электромагнетизма, основанной на теории поля, лагранжиан поля не является дуально-симметричным. Это приводит к проблематичным дуально-асимметричным формам канонических тензоров энергии-импульса, спина и орбитального момента количества движения. Более того, в статье [3] показано, что компоненты этих тензоров противоречат законам спиральности и сохранения энергии. Чтобы устранить это несоответствие между симметриями уравнений Лагранжа и Максвелла, в статье [3] предложена дуально-симметричная лагранжева формулировка классического электромагнетизма. Этот двойной электромагнетизм сохраняет форму уравнений Максвелла, даёт значимые канонические тензоры энергии-импульса и углового момента и обеспечивает самосогласованное разделение спиновых и орбитальных степеней свободы. Это обеспечивает строгий вывод результатов, предложенных в других недавних подходах. В статье [3] проведён нетеровский анализ дуальной симметрии и всех симметрий Пуанкаре, исследуем как локальные, так и интегральные сохраняющиеся величины и показываем, что только дуальный электромагнетизм естественным образом порождает полный самосогласованный набор законов сохранения. В статье [3] также обсуждается наблюдаемость физических величин, отличающих стандартную и двойственную теории, а также связь с квантово-слабыми измерениями и различными оптическими экспериментами.

Последние достижения в формировании оптического луча позволили создать широкий класс структурированных источников света, которые следуют по экзотическим траекториям, открывая множество путей для многочисленных применений. Хотя уравнение Гельмгольца устанавливает строгие условия на поля, которые могут быть физически реализованы, эти ограничения можно снять, если источники можно ввести внутри среды. Однако введение источников не всегда возможно и практично. В статье [4] предложен аналитический подход, который преобразует эффекты необходимых источников изнутри среды к её границам. В статье [4] показано, что полученные граничные условия затем можно использовать для создания любого желаемого оптического поля (амплитуда и фаза). В статье [4] демонстрируется осуществимость подхода, экспериментально генерируя два оптических поля внутри простой среды без источников, демонстрируя контроль над траекториями, фазами и интенсивностью полей.

В статье [5] с помощью потенциалов Дебая полностью получены точные уравнения собственных значений и соответствующие распределения полей мод сердцевин и оболочки для трехслойных, радиально стратифицированных и диэлектрических одноосных оптических волокон; эти режимы включают ТЕ-режим, ТМ-режим и гибридные НЕ/ЕН режимы. Теоретически исследованы деформационные характеристики длиннопериодных волоконных решёток с приложенной осевой деформацией на основе исследования трехслойных одноосных оптических волокон. Когда к волокну прикладывается равномерная осевая деформация, сердцевина, а также внутренняя и внешняя оболочки оптически становятся одноосным кристаллом; то есть оптические оси параллельны оси волокна. В статье [5] получены аналитические выражения тензочувствительности длиннопериодных волоконных решёток. Деформационная чувствительность длиннопериодных волоконных решёток на основе различных мод оболочки, в том числе величина сдвига и направление резонансной длины волны, существенно различаются.

В статье [6] изучаются классические и квантовые аспекты скалярных полей, удовлетворяющих парааксиальному волновому уравнению. В статье [6] сначала определяются

законы сохранения энергии, линейного и углового момента параксиальных полей в классическом контексте, а затем приступаем к квантованию поля и сравниваем результат с традиционными результатами.

Поиск оптических солитонных решений нелинейных уравнений в частных производных стал популярной темой в последние десятилетия. В статье [7] выявлен разнообразный набор волновых решений обобщённой версии нелинейного уравнения Шрёдингера. В статье [7] исследуются две модификации метода обобщенной экспоненциальной рациональной функции, чтобы получить ожидаемые результаты для этой модели. Первый метод основан в первую очередь на использовании элементарных функций, таких как экспоненциальная, тригонометрическая и гиперболическая формы, которые обычно используются для расчёта результатов. Что касается второго метода, то он основан на применении эллиптических функций Якоби для формулирования решений, тогда как основная идея та же, что и у первого метода. В статье [7] чтобы улучшить понимание результатов, отображаются графические свойства решений. Основываясь на результатах статьи [7], можно сделать вывод, что оба метода просты в использовании, но при этом очень эффективны и могут определять различные категории решений в единой структуре.

Уравнение Геджикова–Иванова заняло замечательную область исследований в научной литературе. В статье [8] рассматривается полученное модифицированное уравнение Геджикова–Иванова, которое является новым и не изучалось в литературе. Также модифицированный и унифицированный метод используется для получения приближённых аналитических решений модифицированного уравнения Геджикова–Иванова. Насколько известно, приближённых аналитических решений для неинтегрируемого уравнения комплексного поля до сих пор не найдено. Таким образом, в статье [8] найденные приближённые аналитические решения являются новыми. Единый метод направлен на поиск точных решений интегрируемых уравнений. В этом смысле точного решения модифицированного уравнения Геджикова–Иванова не существует, следовательно, оно неинтегрируемо. Итак, в статье [8] используются приближённые аналитические оптические солитонные решения. Единый метод заключается в выражении решения нелинейных эволюционных уравнений в полиномиальной и рациональной формах через вспомогательную функцию с помощью соответствующего вспомогательного уравнения. Для нахождения точных решений единым методом коэффициенты вспомогательной функции при всех степенях принимаются равными нулю. Для неинтегрируемого уравнения допустимы только приближённые решения. В статье [8] в этом случае вынуждены использовать модифицированный метод. Здесь ненулевые коэффициенты (вычеты) рассматриваются как ошибки, которые не зависят от пространства и времени. Стоит отметить, что это отличается от ошибок, обнаруженных различными численными методами, где они зависят от пространства и времени. Далее, в данном случае максимальная погрешность контролируется адекватным выбором параметров в остатках. Эти решения отображаются на графиках. Наблюдаются, среди прочего, бризерный солитон, чирпированный солитон и солитон M -образной формы. Кроме того, исследована нестабильность модуляции и обнаружено, что нестабильность модуляции возникает, когда коэффициент нелинейной дисперсии превышает критическое значение.

В статье [9] дан краткий обзор классической модели атома Лоренца, взаимодействующего с оптическим полем. Затем в статье [9] решается вопрос, как следует изменить уравнения, описывающие поведение атома, чтобы включить квантование уровня атомной энергии. Простое обсуждение того, какие модификации имеют смысл, даёт сильный аргумент в пользу правдоподобности оптических уравнений Блоха. По сравнению со стандартным выводом, этот аргумент менее строгий, но имеет определенную педагогическую привлекательность: он просто предполагает два атомных состояния с разницей

в энергии $\hbar\omega$, а не обращается к уравнению Шрёдингера. Кроме того, удаётся более или менее угадать правильные уравнения с минимальным формализмом, основанном на уравнениях Блоха.

Выборка плотного светового поля является важной основой для перефокусировки, оценки глубины и трехмерной визуализации. Трудно получить плотное световое поле высокого разрешения с помощью большой матрицы камер и дорогостоящего оборудования. В то же время существующие устройства хранения и пропускная способность передачи также ограничивают постобработку и применение этой технологии. Чтобы эффективно восстановить угловую область светового поля на основе разреженных данных светового поля, в статье [10] анализируются отношения корреляции и ограничений между полем оптического потока и полем движения многокурсных изображений в одной и той же сцене, расширяя традиционные методы. уравнение ограничения оптического потока двумерного изображения к уравнению ограничения оптического потока четырехмерного светового поля и устанавливает эффективную математическую модель. Координатное положение исходного пикселя на новом ракурсном изображении определяется путем поиска координат и восстанавливается его интенсивность. В статье [10] экспериментальные результаты многосценной плотной реконструкции показывают, что предложенный метод позволяет с высоким качеством восстанавливать информацию о текстуре, тенях и цвете в световом поле сцены с длинной базой. Результаты количественной оценки показывают, что алгоритм можно применять для реконструкции плотного светового поля сложных сцен. Алгоритм в статье [10] подходит только для случая ограничения оптического потока в линейном световом поле, а последующие исследования будут сосредоточены на случае ограничения нелинейного оптического потока.

В статье [11] рассматриваются представления оптического уравнения Дирака, особенно те, в которых гамильтониан является чисто вещественным. Для уравнений Максвелла это эквивалентно майорановскому представлению безмассового уравнения Дирака (Вейля). Проведены аналогии между дираковским, киральным и майорановским представлениями уравнений Дирака и оптическими уравнениями Дирака, а также получены два новых оптических представления Майораны. Точно так же, как представления Дирака и киральные представления связаны с состояниями оптического спина и спиральности, эти представления Майораны оптического уравнения Дирака связаны с линейной поляризацией света. Это даёт возможность сравнить уравнения электронных и электромагнитных волн в контексте классической теории поля.

Двумерный материал, образованный, например, самоорганизующимся молекулярным монослоем или одним слоем материала, может эффективно взаимодействовать с фотонными нанополостями, потенциально достигая режима сильной связи. Связь можно смоделировать с использованием классических моделей гармонических осцилляторов или гамильтонианов квантовой электродинамики полости, которые часто пренебрегают прямыми диполь-дипольными взаимодействиями внутри монослоя. В статье [12] диагонализуются полный гамильтониан системы, включая эти прямые диполь-дипольные взаимодействия. Основное влияние на оптические свойства типичной двумерной системы заключается просто в перенормировке эффективной энергии яркого коллективного возбуждения монослоя, связанного с нанофотонной модой. С другой стороны, в статье [12] показано, что в ситуациях экстремального ограничения поля, больших дипольных моментов перехода и низких потерь полное включение прямых диполь-дипольных взаимодействий имеет решающее значение для правильного захвата оптического отклика, в котором участвует множество коллективных состояний. Для количественной оценки этого результата в статье [12] предложено простое уравнение, которое указывает условие, при котором прямые взаимодействия сильно изменяют оп-

тический отклик.

В статье [13] предложены новые формы граничных интегральных уравнений для автоматизированного проектирования и моделирования оптических схем ближнего поля. Эти интегральные уравнения можно легко решить численно, используя метод граничных элементов или метод моментов, без использования сложных методов расширения мод для открытых волноводных структур. Например, новые уравнения используются для проектирования двумерного оптического манипулятора частиц, а эффективность и корректность демонстрируются численными результатами.

В статье [14] представлен обзор интерпретации процесса регистрации в ближнепольной оптической микроскопии рассмотрен на основе дискуссии о возможности установления прямых сравнений экспериментальных изображений с решениями уравнений Максвелла или электромагнитной локальной плотности состояний. На основе простых физических аргументов ожидается, что решения уравнений Максвелла должны согласовываться с изображениями, полученными с помощью собирающих микроскопов ближнего поля, в то время как электромагнитная локальная плотность состояний должна учитываться для практической интерпретации режима освещения ближнего поля в полевых микроскопах. В статье [14] рассматриваются изображения ближнепольного микроскопа в режиме сбора, где действительно были идентифицированы условия для получения хорошего согласия с решениями уравнений Максвелла. В контексте микроскопов ближнего поля с собирающим режимом принципиально разные функциональные возможности между диэлектрическими и позолоченными наконечниками были чётко идентифицированы экспериментально путём проверки решений уравнений Максвелла. Оказывается, что диэлектрические наконечники улавливают сигнал, пропорциональный напряжённости оптического электрического поля, тогда как наконечники с золотым покрытием обнаруживают сигнал, пропорциональный напряжённости оптического магнитного поля. В статье [14] обсуждаются возможные последствия этого удивительного явления.

Таким образом, обзор литературы показывает, что нелокальные полевые уравнения являются перспективными уравнениями для описания оптических свойств наноструктурных сред.

Модель

Применим метод нелокальных полевых уравнений для описания распространения оптических волн в наноструктурных средах с учётом высших мультипольных моментов для различных типов разрешённых квантовых переходов в спектре взаимодействующих атомов наноструктурной среды. Нелокальное полевое уравнение представляет собой интегральное уравнение, которое описывает взаимодействие системы взаимодействующих движущихся зарядов в наноструктурной среде с полем внешней оптической волны. Для учёта высших мультипольных моментов в системе взаимодействующих атомов наноструктурной среды необходимо в разложении запаздывающих потенциалов, определяющих функцию Лагранжа системы взаимодействующих движущихся зарядов, учесть слагаемые, содержащие более высокие степени смещений атомных электронов относительно своих атомных ядер в наноструктурной среде.

Запишем нелокальные уравнения для микроскопических полей в случае распространения электромагнитных волн в наноструктурных средах с учётом электрических дипольных, электрических квадрупольных и магнитных дипольных вкладов в оптические свойства наноструктурной среды. Пусть вектора $\mathbf{E}'(\mathbf{r}_i)$ и $\mathbf{H}'(\mathbf{r}_i)$ представляют собой вектора напряжённостей электрического и магнитного макроскопических полей в некоторой точке наблюдения \mathbf{r}_i . Обозначим через $\boldsymbol{\mu}_i(\mathbf{r}_i)$ магнитный дипольный момент и $\mathbf{q}_i(\mathbf{r}_i)$ вектор, связанный с тензором квадрупольного момента атома в наноструктурной среде. Тогда соответствующие нелокальные полевые уравнения для микроскопиче-

ских полей примут следующий вид [15]:

$$\mathbf{E}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{E}_I(\mathbf{r}_i) + \sum_{j \neq i} \left(\nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{d}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} - \nabla \times \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{q}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} + ik_0 \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \boldsymbol{\mu}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right), \quad (1)$$

$$\mathbf{H}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{H}_I(\mathbf{r}_i) + \sum_{j \neq i} \left(-ik_0 \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{d}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} + ik_0 \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{q}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} + \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \boldsymbol{\mu}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right), \quad (2)$$

где $k_0 = \omega/c$ – волновое число оптической волны в вакууме, $\mathbf{E}_I(\mathbf{r}_i)$ – напряжённость электрического поля внешней оптической волны в точке наблюдения \mathbf{r}_i , $\mathbf{H}_I(\mathbf{r}_i)$ – напряжённость магнитного поля внешней оптической волны в точке наблюдения \mathbf{r}_i .

Введём относительное расстояние между атомом, находящимся в точке наблюдения поля, и текущим расположением i -го атома наноструктурной среды $R_{ij} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$. Тогда нелокальные полевые уравнения в наноструктурной среде (1) и (2) примут вид:

$$\mathbf{E}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{E}_I(\mathbf{r}_i) + \sum_{j \neq \ell} \left(\nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0 R_{ij}) \mathbf{d}_j(\mathbf{r}_j)}{R_{ij}} - \nabla \times \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0 R_{ij}) \mathbf{q}_j(\mathbf{r}_j)}{R_{ij}} + ik_0 \nabla \times \frac{\exp(ik_0 R_{ij}) \boldsymbol{\mu}_j(\mathbf{r}_j)}{R_{ij}} \right), \quad (3)$$

$$\mathbf{H}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{H}_I(\mathbf{r}_i) + \sum_{j \neq \ell} \left(-ik_0 \nabla \times \frac{\exp(ik_0 R_{ij}) \mathbf{d}_j(\mathbf{r}_j)}{R_{ij}} + ik_0 \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0 R_{ij}) \mathbf{q}_j(\mathbf{r}_j)}{R_{ij}} + \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0 R_{ij}) \boldsymbol{\mu}_j(\mathbf{r}_j)}{R_{ij}} \right), \quad (4)$$

Введём выражение для запаздывающей функции Грина

$$G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = G(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) = G(R_{ij}) = \frac{\exp(ik_0 R_{ij})}{R_{ij}} = \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}. \quad (5)$$

После введения запаздывающей функции Грина (5) нелокальные полевые уравнения в наноструктурной среде (3) и (4) запишутся в виде

$$\mathbf{E}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{E}_I(\mathbf{r}_i) + \sum_{j \neq i} \left(\nabla \times \nabla \times G(R_{ij}) \mathbf{d}_j(\mathbf{r}_j) - \nabla \times \nabla \times \nabla \times G(R_{ij}) \mathbf{q}_j(\mathbf{r}_j) + ik_0 \nabla \times G(R_{ij}) \boldsymbol{\mu}_j(\mathbf{r}_j) \right), \quad (6)$$

$$\mathbf{H}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{H}_I(\mathbf{r}_i) + \sum_{j \neq i} \left(-ik_0 \nabla \times G(R_{ij}) \mathbf{d}_j(\mathbf{r}_j) + ik_0 \nabla \times \nabla \times G(R_{ij}) \mathbf{q}_j(\mathbf{r}_j) + \nabla \times \nabla \times G(R_{ij}) \boldsymbol{\mu}_j(\mathbf{r}_j) \right), \quad (7)$$

Переход к соответствующим нелокальным полевым интегральным уравнениям распространения электромагнитных волн осуществляется в (1) и (2) с помощью величин

$$\mathbf{P}(\mathbf{r}_j) = \frac{1}{V} \sum_{j=1}^N \mathbf{d}_j(\mathbf{r}_j) = \frac{1}{V} \sum_{j=1}^N e_j \mathbf{r}_j, \quad (8)$$

$$\mathbf{Q}_\alpha(\mathbf{r}_j) = \frac{1}{V} \sum_{j=1}^N \mathbf{q}_\alpha(\mathbf{r}_j) = \frac{1}{V} \sum_{j=1}^N e_j \left(3(\mathbf{r}_j)_\alpha (\mathbf{r}_j)_\beta - (\mathbf{r}_j)^2 \delta_{\alpha\beta} \right) n_\beta, \quad (9)$$

$$\mathbf{M}(\mathbf{r}_j) = \frac{1}{V} \sum_{j=1}^N \boldsymbol{\mu}_j(\mathbf{r}_j) = \frac{1}{V} \sum_{j=1}^N \frac{1}{2} [\mathbf{r}_j, \mathbf{v}_j], \quad (10)$$

где N – число атомов в наноструктурной среде, V – объём наноструктурной среды. Тогда получаем полевые интегральные уравнения распространения электромагнитных волн в наноструктурной среде в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{E}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{E}_I(\mathbf{r}_i) + \int_V \left(\nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{P}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} - \right. \\ \left. - \nabla \times \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{Q}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} + ik_0 \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{M}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right) d\mathbf{r}_j, \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{H}_I(\mathbf{r}_i) + \int_V \left(-ik_0 \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{P}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} + \right. \\ \left. + ik_0 \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{Q}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} + \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{M}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right) d\mathbf{r}_j. \quad (12) \end{aligned}$$

Если разрешены только электрические дипольные переходы в спектре взаимодействующих атомов наноструктурной среды, то уравнения (11) и (12) примут вид:

$$\mathbf{E}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{E}_I(\mathbf{r}_i) + \int_V \left(\nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{P}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right) d\mathbf{r}_j, \quad (13)$$

$$\mathbf{H}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{H}_I(\mathbf{r}_i) + \int_V \left(-ik_0 \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{P}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right) d\mathbf{r}_j. \quad (14)$$

Если разрешены только электрические квадрупольные переходы в спектре взаимодействующих атомов наноструктурной среды, то уравнения (11) и (12) примут вид:

$$\mathbf{E}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{E}_I(\mathbf{r}_i) + \int_V \left(-\nabla \times \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{Q}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right) d\mathbf{r}_j, \quad (15)$$

$$\mathbf{H}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{H}_I(\mathbf{r}_i) + \int_V \left(ik_0 \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{Q}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right) d\mathbf{r}_j. \quad (16)$$

Если разрешены только магнитные дипольные переходы в спектре взаимодействующих атомов наноструктурной среды, то уравнения (11) и (12) примут вид:

$$\mathbf{E}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{E}_I(\mathbf{r}_i) + \int_V \left(ik_0 \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{M}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right) d\mathbf{r}_j, \quad (17)$$

$$\mathbf{H}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{H}_I(\mathbf{r}_i) + \int_V \left(\nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{M}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right) d\mathbf{r}_j. \quad (18)$$

Если разрешены только электрические дипольные переходы и электрические квадрупольные переходы в спектре взаимодействующих атомов наноструктурной среды, то уравнения (11) и (12) примут вид:

$$\mathbf{E}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{E}_I(\mathbf{r}_i) + \int_V \left(\nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{P}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} - \nabla \times \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{Q}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right) d\mathbf{r}_j, \quad (19)$$

$$\mathbf{H}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{H}_I(\mathbf{r}_i) + \int_V \left(-ik_0 \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{P}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} + ik_0 \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{Q}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right) d\mathbf{r}_j. \quad (20)$$

Если разрешены только электрические дипольные переходы и магнитные дипольные переходы в спектре взаимодействующих атомов наноструктурной среды, то уравнения (11) и (12) примут вид:

$$\mathbf{E}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{E}_I(\mathbf{r}_i) + \int_V \left(\nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{P}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} + ik_0 \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{M}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right) d\mathbf{r}_j, \quad (21)$$

$$\mathbf{H}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{H}_I(\mathbf{r}_i) + \int_V \left(-ik_0 \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{P}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} + \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{M}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right) d\mathbf{r}_j. \quad (22)$$

Если разрешены только электрические квадрупольные переходы и магнитные дипольные переходы в спектре взаимодействующих атомов наноструктурной среды, то уравнения (11) и (12) примут вид:

$$\mathbf{E}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{E}_I(\mathbf{r}_i) + \int_V \left(-\nabla \times \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{Q}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} + ik_0 \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{M}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right) d\mathbf{r}_j, \quad (23)$$

$$\mathbf{H}'(\mathbf{r}_i) = \mathbf{H}_I(\mathbf{r}_i) + \int_V \left(ik_0 \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{Q}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} + \nabla \times \nabla \times \frac{\exp(ik_0|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \mathbf{M}_j(\mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \right) d\mathbf{r}_j. \quad (24)$$

Полученные нелокальные интегральные уравнения для действующих полей позволяют учитывать различные типы разрешённых квантовых переходов в спектре взаимодействующих атомов наноструктурной среды для описания распространения оптических волн в наноструктурных средах.

Заключение

Предложенные нелокальные полевые уравнения позволяют учитывать различные типы разрешённых квантовых переходов для описания распространения оптических волн в наноструктурных средах. Учёт различных типов квантовых переходов высшей мультипольности в спектре взаимодействующих атомов наноструктурной среды может существенно улучшить точность описания оптических явлений в наноструктурных средах при помощи нелокальных полевых уравнений в оптике.

В заключении можно сделать следующие выводы:

1. подход на основе нелокальных полевых уравнений представляет собой перспективный подход для описания оптических свойств наноструктурных сред благодаря учёту различных типов квантовых переходов в спектре взаимодействующих атомов наноструктурной среды;
2. применение нелокальных полевых уравнений может способствовать проектированию приборов и устройств на основе наноструктур с заданными оптическими свойствами.

Гипотезой исследования, состоящая в том, что если использовать нелокальные полевые уравнения с учётом различных типов квантовых переходов высшей мультипольности, то можно улучшить точность описания оптических свойств наноструктур по сравнению с локальными моделями классической электродинамики, подтверждена полностью.

Можно преодолеть некоторые трудности, если использовать метод интегральных уравнений в оптике для того, чтобы предсказывать состояния наноматериала. Такой метод, тем не менее, принимает во внимание только взаимодействие между оптическим излучением и наноструктурной системой. Теоретическая модель никак не учитывает то, что пробное оптическое излучение существует в данной системе с самого начала.

Полученные нелокальные полевые уравнения для наноструктурных сред с учётом различных типов квантовых переходов в атомах наноструктурной среды могут быть использованы для создания новых теоретических моделей наноструктурных сред и наносистем, которые будут более точными и эффективными, чем существующие модели. Нелокальные нелокальные полевые уравнения для наноструктурных сред и наносистем позволяют учитывать эффекты, которые не учитываются в традиционных моделях классической электродинамики, такие как эффект локального поля и эффект ближнего поля для наноструктурных сред и наносистем. Результаты исследования нелокальных полевых уравнений для наноструктурных сред и наносистем могут быть использованы для разработки новых методов описания физических явлений в наноструктурах и наносистемах из наноматериалов с заданными физическими свойствами для различных приложений в оптоэлектронике, таких как фотовольтаика, наносенсорика и нанолазмоника.

Список использованных источников

1. Cameron R. P., Barnett S. M., Yao A. M. Optical helicity, optical spin and related quantities in electromagnetic theory // *New Journal of Physics*. — 2012. — may. — Vol. 14, no. 5. — P. 053050. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/14/5/053050>.
2. You X.-L., Li Ch.-F. Lorentz covariance of optical Dirac equation and spinorial photon field // *New Journal of Physics*. — 2021. — jul. — Vol. 23, no. 7. — P. 073030. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/ac1142>.
3. Bliokh K. Y., Bekshaev A. Y., Nori F. Dual electromagnetism: helicity, spin, momentum and angular momentum // *New Journal of Physics*. — 2013. — mar. — Vol. 15, no. 3. — P. 033026. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/15/3/033026>.
4. Aborahama Y., Mojahedi M. Designing optical fields in three dimensions using source-boundary transformations // *Physical Review Applied*. — 2021. — apr. — Vol. 15, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.044019>.
5. Zhang Zi-jia, Shi Wen-kang. Eigenvalue and field equations of three-layered uniaxial fibers and their applications to the characteristics of long-period fiber gratings with applied axial strain // *Journal of the Optical Society of America A*. — 2005. — nov. — Vol. 22, no. 11. — P. 2516. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.22.002516>.
6. Aiello A. Field theory of monochromatic optical beams: II. Classical and quantum paraxial fields // *Journal of Optics*. — 2019. — dec. — Vol. 22, no. 1. — P. 014002. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/2040-8986/ab5c6d>.
7. Ghanbari B., Baleanu D. Applications of two novel techniques in finding optical soliton solutions of modified nonlinear Schrödinger equations // *Results in Physics*. — 2023. — jan. — Vol. 44. — P. 106171. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2022.106171>.
8. Abdel-Gawad H. I. Approximate-analytic optical soliton solutions of a modified-Gerdjikov-Ivanov equation: modulation instability // *Optical and Quantum Electronics*. — 2023. — feb. — Vol. 55, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11082-023-04566-6>.
9. Supplee J. M. Optical Bloch equations: informal motivation without the Schrödinger equation // *American Journal of Physics*. — 2000. — feb. — Vol. 68, no. 2. — P. 180–185. — URL: <http://dx.doi.org/10.1119/1.19392>.
10. A dense light field reconstruction algorithm for four-dimensional optical flow constraint equation / J. Liu [et al.] // *Pattern Recognition*. — 2023. — feb. — Vol. 134. — P. 109101. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patcog.2022.109101>.
11. Dennis M. R., Tijssen T., Morgan M. A. On the Majorana representation of the optical Dirac equation // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. — 2023. — jan. — Vol. 56, no. 2. — P. 024004. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1751-8121/acb182>.
12. Ribeiro S., Aizpurua J., Esteban R. Influence of direct dipole-dipole interactions on the optical response of two-dimensional materials in strongly inhomogeneous infrared cavity fields // *Physical Review A*. — 2023. — oct. — Vol. 108, no. 4. — P. 043718. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.108.043718>.

13. Tanaka M., Tanaka K. Boundary integral equations for computer aided design of near-field optics // Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics). — 1996. — jan. — Vol. 79, no. 11. — P. 10–18. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/ecjb.4420791102>.
14. Direct interpretation of near-field optical images / A. Dereux [et al.] // Journal of Microscopy. — 2001. — may. — Vol. 202, no. 2. — P. 320–331. — URL: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2818.2001.00868.x>.
15. Gadomsky O. N., Altunin K. K. The problem of two electrons in an external field and the method of integral equations in optics // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 1998. — nov. — Vol. 87, no. 5. — P. 842–854. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/1.558733>.

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

IstinaResearcherID  66185348

Original article
PACS 42.25.Bs
OCIS 310.6628
MSC 00A79

Nonlocal field equations in nanostructures taking into account higher multipole moments

K. K. Altunin 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted November 27, 2023
Resubmitted November 30, 2023
Published December 12, 2023

Abstract. Nonlocal field equations are proposed to describe the propagation of optical waves in nanostructures, taking into account higher multipole moments for various types of allowed quantum transitions. Taking into account various types of quantum transitions of higher multipolarity in the spectrum of interacting atoms of a nanostructured medium can significantly improve the accuracy of the description of optical phenomena in nanostructured media using nonlocal field equations.

Keywords: nanostructured medium, electric dipole transitions, electric quadrupole transitions, magnetic dipole transitions, nonlocal equations, field equations, macroscopic fields, microscopic fields

References


1. Cameron R. P., Barnett S. M., Yao A. M. Optical helicity, optical spin and related quantities in electromagnetic theory // *New Journal of Physics*. — 2012. — may. — Vol. 14, no. 5. — P. 053050. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/14/5/053050>.
2. You X.-L., Li Ch.-F. Lorentz covariance of optical Dirac equation and spinorial photon field // *New Journal of Physics*. — 2021. — jul. — Vol. 23, no. 7. — P. 073030. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/ac1142>.
3. Bliokh K. Y., Bekshaev A. Y., Nori F. Dual electromagnetism: helicity, spin, momentum and angular momentum // *New Journal of Physics*. — 2013. — mar. — Vol. 15, no. 3. — P. 033026. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/15/3/033026>.
4. Aborahama Y., Mojahedi M. Designing optical fields in three dimensions using source-boundary transformations // *Physical Review Applied*. — 2021. — apr. — Vol. 15, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.044019>.
5. Zhang Zi-jia, Shi Wen-kang. Eigenvalue and field equations of three-layered uniaxial fibers and their applications to the characteristics of long-period fiber gratings with applied axial strain // *Journal of the Optical Society of America A*. — 2005. — nov. — Vol. 22, no. 11. — P. 2516. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.22.002516>.




6. Aiello A. Field theory of monochromatic optical beams: II. Classical and quantum paraxial fields // *Journal of Optics*. — 2019. — dec. — Vol. 22, no. 1. — P. 014002. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/2040-8986/ab5c6d>.
7. Ghanbari B., Baleanu D. Applications of two novel techniques in finding optical soliton solutions of modified nonlinear Schrödinger equations // *Results in Physics*. — 2023. — jan. — Vol. 44. — P. 106171. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2022.106171>.
8. Abdel-Gawad H. I. Approximate-analytic optical soliton solutions of a modified-Gerdjikov–Ivanov equation: modulation instability // *Optical and Quantum Electronics*. — 2023. — feb. — Vol. 55, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11082-023-04566-6>.
9. Supplee J. M. Optical Bloch equations: informal motivation without the Schrödinger equation // *American Journal of Physics*. — 2000. — feb. — Vol. 68, no. 2. — P. 180–185. — URL: <http://dx.doi.org/10.1119/1.19392>.
10. A dense light field reconstruction algorithm for four-dimensional optical flow constraint equation / J. Liu [et al.] // *Pattern Recognition*. — 2023. — feb. — Vol. 134. — P. 109101. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patcog.2022.109101>.
11. Dennis M. R., Tijssen T., Morgan M. A. On the Majorana representation of the optical Dirac equation // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. — 2023. — jan. — Vol. 56, no. 2. — P. 024004. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1751-8121/acb182>.
12. Ribeiro S., Aizpurua J., Esteban R. Influence of direct dipole-dipole interactions on the optical response of two-dimensional materials in strongly inhomogeneous infrared cavity fields // *Physical Review A*. — 2023. — oct. — Vol. 108, no. 4. — P. 043718. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.108.043718>.
13. Tanaka M., Tanaka K. Boundary integral equations for computer aided design of near-field optics // *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)*. — 1996. — jan. — Vol. 79, no. 11. — P. 10–18. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/ecjb.4420791102>.
14. Direct interpretation of near-field optical images / A. Dereux [et al.] // *Journal of Microscopy*. — 2001. — may. — Vol. 202, no. 2. — P. 320–331. — URL: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2818.2001.00868.x>.
15. Gadomsky O. N., Altunin K. K. The problem of two electrons in an external field and the method of integral equations in optics // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 1998. — nov. — Vol. 87, no. 5. — P. 842–854. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/1.558733>.

Information about authors:

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

E-mail: kostya.altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014
SCOPUS ID  57201126207
IstinaResearcherID  66185348

Научная статья
УДК 535.3
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 1.3.6.
PACS 42.25.Bs
OCIS 310.6628
MSC 00A79

Исследование направленного оптического излучения квантовых точек в наноматериале

О. Н. Захарова , А. С. Федотова  ¹

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

Поступила в редакцию 9 октября 2023 года октября 2023 года*
Опубликована 12 декабря 2023 года

Аннотация. Обсуждаются физические особенности описания излучения системы квантовых точек в наноматериале. Предложено использовать теоретическую модель для расчёта интенсивности оптического излучения системы квантовых точек в наноматериале.

Ключевые слова: квантовая точка, наноматериал, оптическое излучение, интенсивность излучения

Введение

В настоящее время с помощью современных нанотехнологий получено большое количество наноматериалов, обладающих уникальными физическими свойствами. Наноматериалы находят всё более широкое применение в различных технологических процессах получения новых наноразмерных оптоэлектронных приборов. Например, для получения наноструктур используются специальные методы такие, как метод осаждения из раствора, который позволяет получать металлические наночастицы. Существуют и активно развиваются методы синтеза наночастиц из неорганических и органических соединений с использованием различных нанотехнологий.

Целью работы является исследование физических явлений излучения и рассеяния оптического излучения наноматериалами с квантовыми точками.

Задачи исследования состоят в том, чтобы написать обзор работ по физическим свойствам наноматериалов, разработать теоретическую модель излучения наноматериала с квантовыми точками, провести численное исследование интенсивности оптического излучения наноматериала с квантовыми точками.

Объектом исследования является наноматериал с квантовыми точками. Предметом исследования является совокупность физических свойств наноматериала с квантовыми точками.

¹E-mail: farista2006@mail.ru

В качестве материалов исследования используются наноматериалы, содержащие квантовые точки. Материалами исследования являются наноматериалы с квантовыми точками, находящимися в поле оптического излучения.

Научная новизна исследования состоит в том, что впервые проведено численное исследование угловой зависимости интенсивности оптического излучения системы квантовых точек в наноматериале.

Гипотезой исследования является предположение о том, что наноматериалы с квантовыми точками обладают уникальными физическими свойствами, которые могут быть использованы для создания высокоэффективных компьютерных дисплеев с улучшенными характеристиками в зависимости от формы и расположения квантовых точек.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что исследование вносит вклад в понимание физических процессов, происходящих в наноматериалах с квантовыми точками. Практическая значимость исследования состоит в том, что результаты исследования наноматериалов с квантовыми точками могут быть использованы при разработке новых технологий создания компьютерных дисплеев с улучшенными характеристиками в зависимости от формы и расположения квантовых точек.

Обзор

Рассеяние света является частью нашего повседневного опыта. Голубое небо, красное небо на закате, белый свет от облаков, рассеяние от поверхностей и рассеяние Томпсона — всё это проявления рассеяния света. Рэлеевское рассеяние — это упругое рассеяние света частицами, намного меньшими, чем длина волны света в прозрачных жидкостях и газах. Общий случай рассеяния частиц любого размера называется рассеянием Ми. Рассеяние в рэлеевском пределе легко получить в замкнутой форме.

В 1909 году Густав Ми разработал строгий метод расчёта интенсивности света, рассеянного однородными сферами любого размера, по сравнению с длиной волны падающего света. Решение значительно сложнее, чем приближение Рэлея, хотя это просто случай использования уравнений Максвелла для удовлетворения граничных условий на поверхности рассеивающих сфер. Система имеет сферическую симметрию, поэтому падающая волна разлагается в бесконечный ряд векторных сферических гармоник с учетом граничных условий на поверхности сферы. После значительных манипуляций определяются рассеянные поля и могут быть рассчитаны дифференциальные и полные сечения. Этот формализм редко использовался до 1980-х годов, когда стали доступны большие мейнфреймы. Однако в настоящее время расчёты можно выполнять на персональных компьютерах, и код рассеяния Ми легко доступен.

Термин «рассеяние света» также применим к случаю рассеяния на флуктуациях плотности. Именно эти флуктуации плотности вызывают рассеяние в оптически плотных средах. Хотя математические выражения похожи, лежащая в их основе физика несколько отличается, поскольку рассеяние флуктуациями включает термодинамические аргументы, а рассеяние частицами — нет. Рассеяние на флуктуациях плотности в идеальных газах имеет ту же функциональную форму, что и рассеяние на разбавленных взвешах частиц, малых по сравнению с длиной волны в однородной среде. Под гомогенностью подразумевается, что атомная или молекулярная неоднородность мала по сравнению с длиной волны падающего света. Производство, контроль, манипулирование и использование света лежат в основе многих технологий в современной оптоэлектронике. Рассеяние света играет ключевую роль во всех этих процессах. Конечно, рассеяние света мелкими частицами имеет долгую историю, где его изучали в таких контекстах, как кучевые облака, цвет неба и радуга, и использовали в различных стеклянных изделиях и окнах средневековья. Дело в том, что такая классическая тема лежит в основе многих принципиально новых и неожиданных достижений науки и техники. Ключевым

моментом является текущее внимание к наномасштабу и особенно эффектам ближнего поля в наномасштабе, в то время как большая часть более старых классических исследований была ориентирована на доступное поведение дальнего поля.

Современные наноструктурные материалы, обладающие высокой диэлектрической проницаемостью, вызвали интерес как в научных, так и в промышленных областях из-за их широкого применения, таких как оружие с высокой кинетической энергией [1] и устройства хранения энергии [2–7]. Полимерные нанокомпозиты с высокой диэлектрической проницаемостью находят широкое применение в электронной и электротехнической промышленности из-за простоты обработки и низкой стоимости.

В статье [8] было продемонстрировано, что наноструктурные материалы с квази нулевой диэлектрической проницаемостью обладают уникальными электромагнитными свойствами, а также предложена концепция ширины запрещённой зоны по энергии излучения для наночастицы из материала с квази нулевой диэлектрической проницаемостью, связанной с квантовым излучателем.

В статье [9] исследованы физические свойства наноструктур в форме эллипсоидов, вытянутых сфероидов, колец и цилиндров, которые проявляют резонансные поверхностные и резонаторные моды с приложениями в нанофотонике и нанолазмонике.

В статье [10] рассматриваются физические свойства наноструктуры, состоящая из полупроводниковой квантовой точки, связанной с металлической наночастицей.

Неклассические излучательные системы на основе полупроводниковых квантовых точек, изготовленные по эпитаксиальной технологии, были продемонстрированы как перспективные кандидаты в качестве фундаментальных компонентов многих нанопотонных устройств, включая лазеры [11–13], оптические усилители [14, 15] и широкополосные источники [16–18].

В начале 90-х годов активная и пассивная синхронизация мод лазеров с квантовыми ямами с краевым излучением была продемонстрирована несколькими группами [19–24].

Представленный обзор литературы показывает актуальность проблемы исследования излучения и рассеяния оптического излучения системой квантовых точек в наноструктурах.

Результаты

Интенсивность излучения частиц наноматериала вычисляется по формуле:

$$I = I_0 \frac{9V^2}{32\pi a^2} k_0^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \exp(-s n d_1) F(\theta_0) (1 + \cos^2 \theta_0), \quad (1)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число вакуума, λ – длина волны излучения.

$$F(\theta_0) = \exp\left(-\frac{3f_1 d_1 \sqrt{n_1^2 - n_0^2} \sin^2 \theta_0 a^3}{4\lambda^4}\right), \quad (2)$$

где $n = n_p/n_m$, f_1 – фактор заполнения квантовыми точками наноматериала, d_1 – толщина плёнки активного наноматериала, a – характерный радиус квантовых точек в наноматериале.

$$s = 24\pi^3 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) \frac{V^2}{\lambda^4}, \quad (3)$$

где $I_0 = 0.482 \cdot 10^{-9}$ Вт/м². Приведём результаты численных расчётов.

На рис. 1 изображена диаграмма направленности излучения системы квантовых точек в наноматериале в случае а) узконаправленного излучения, б) широконаправленного излучения.

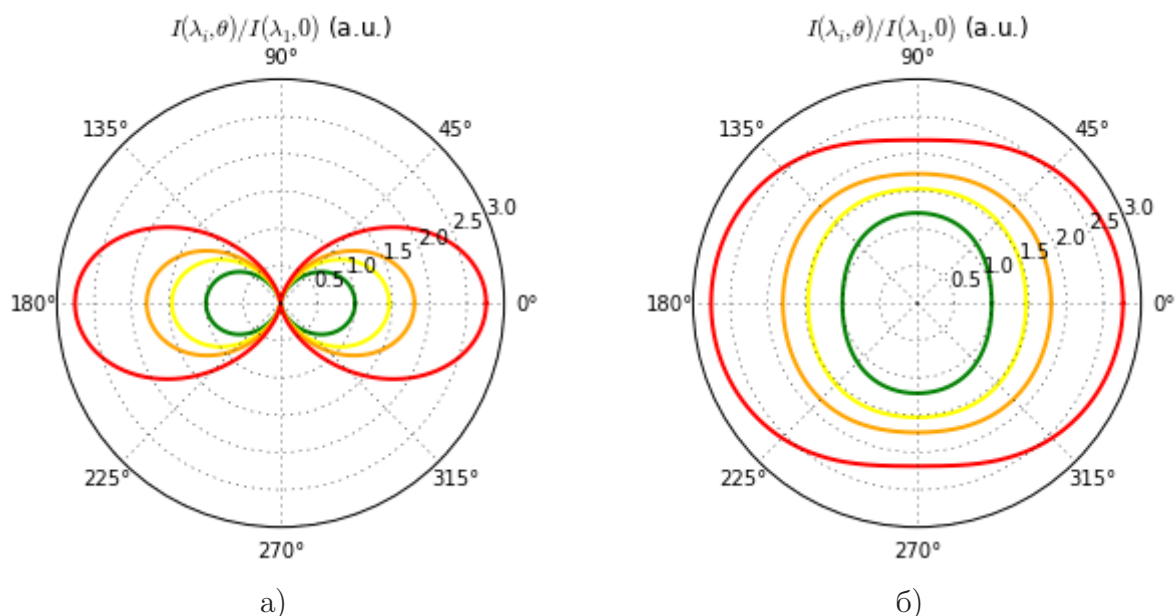


Рис. 1. Диаграмма направленности излучения системы квантовых точек в наноматериале в случае а) узконаправленного излучения, б) широконаправленного излучения.

Заключение

Численное исследование интенсивности направленного оптического излучения квантовых точек в наноматериале показывает возможность получить узкую направленность излучения системы квантовых точек в наноматериале. Оптические свойства наноматериалов могут быть улучшены за счёт введения в состав наноматериала системы квантовых точек со специальными физическими свойствами, например с различной степенью фотолюминесценции, которой можно управлять, изменяя структуру и химический состав системы квантовых точек.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что наноматериалы с квантовыми точками обладают уникальными физическими свойствами, которые могут быть использованы для создания высокоэффективных компьютерных дисплеев с улучшенными характеристиками в зависимости от формы и расположения квантовых точек, подтверждена полностью.

Список использованных источников

1. Core@Double-shell structured BaTiO₃-polymer nanocomposites with high dielectric constant and low dielectric loss for energy storage application / Liyuan Xie [et al.] // The Journal of Physical Chemistry C. — 2013. — oct. — Vol. 117, no. 44. — P. 22525–22537. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp407340n>.
2. Dielectric, mechanical and thermal properties of all-organic PI/PSF composite films by in situ polymerization / Peng Li [et al.] // e-Polymers. — 2020. — jan. — Vol. 20, no. 1. — P. 226–232. — URL: <https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0020>.
3. Lee Ji-Won, Koh Jung-Hyuk. Enhanced dielectric properties of Ag-doped CCTO ceramics for energy storage devices // Ceramics International. — 2017. — aug. — Vol. 43, no. 12. — P. 9493–9497. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.130>.
4. Flexible hdC-G reinforced polyimide composites with high dielectric permittivity / Xiaojian Liao [et al.] // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. — 2017. —

- oct. — Vol. 101. — P. 50–58. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.011>.
5. High energy density nanocomposites based on surface-modified BaTiO₃ and a ferroelectric polymer / Philseok Kim [et al.] // ACS Nano. — 2009. — aug. — Vol. 3, no. 9. — P. 2581–2592. — URL: <https://doi.org/10.1021/nn9006412>.
 6. Highly foldable PANi@CNTs/PU dielectric composites toward thin-film capacitor application / Wenhui Xu [et al.] // Materials Letters. — 2017. — apr. — Vol. 192. — P. 25–28. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.01.064>.
 7. Silicone elastomers with high-permittivity ionic liquids loading / Xue Liu [et al.] // Advanced Engineering Materials. — 2019. — aug. — Vol. 21, no. 10. — URL: <https://doi.org/10.1002/adem.201900481>.
 8. Radiative energy band gap of nanostructures coupled with quantum emitters around the epsilon-near-zero frequency / Tao Gong [et al.] // Physical Review B. — 2022. — aug. — Vol. 106, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.085422>.
 9. Bagherian M., Passian A. Quantum states of cylindrical surface charge density for modeling plasmonic circuit elements: Nanowires, nanorods, cavities, and waveguides // Physical Review A. — 2022. — jun. — Vol. 105, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.105.063507>.
 10. Efficient exciton generation in a semiconductor quantum-dot–metal–nanoparticle composite structure using conventional chirped pulses / Dionisis Stefanatos [et al.] // Physical Review A. — 2022. — may. — Vol. 105, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.105.052604>.
 11. Perspectives on advances in quantum dot lasers and integration with Si photonic integrated circuits / Chen Shang [et al.] // ACS Photonics. — 2021. — aug. — Vol. 8, no. 9. — P. 2555–2566. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/acsp Photonics.1c00707>.
 12. Recent developments of quantum dot materials for high speed and ultrafast lasers / Zhonghui Yao [et al.] // Nanomaterials. — 2022. — mar. — Vol. 12, no. 7. — P. 1058. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/nano12071058>.
 13. Edge emitting mode-locked quantum dot lasers / Amit Yadav [et al.] // Progress in Quantum Electronics. — 2023. — jan. — Vol. 87. — P. 100451. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pquantelec.2022.100451>.
 14. 1.5- μm indium phosphide-based quantum dot lasers and optical amplifiers: the impact of atom-like optical gain material for optoelectronics devices / Sven Bauer [et al.] // IEEE Nanotechnology Magazine. — 2021. — apr. — Vol. 15, no. 2. — P. 23–36. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/MNANO.2020.3048103>.
 15. Khan Mohammed Zahed Mustafa, Ng Tien Khee, Ooi Boon S. Self-assembled InAs/InP quantum dots and quantum dashes: material structures and devices // Progress in Quantum Electronics. — 2014. — nov. — Vol. 38, no. 6. — P. 237–313. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pquantelec.2014.11.001>.
 16. Integration of emission-wavelength-controlled InAs quantum dots for ultra-broadband near-infrared light source / Nobuhiko Ozaki [et al.] // Nanomaterials and Nanotechnology. — 2014. — jan. — Vol. 4. — P. 26. — URL: <http://dx.doi.org/10.5772/59315>.

17. Broadband light sources based on InAs/InGaAs metamorphic quantum dots / L. Seravalli [et al.] // Journal of Applied Physics. — 2016. — apr. — Vol. 119, no. 14. — P. 143102–1–143102–8. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4945436>.
18. Optical and electronic properties of symmetric InAs/(In, Al, Ga)As/InP quantum dots formed by ripening in molecular beam epitaxy: a potential system for broad-range single-photon telecom emitters / P. Holewa [et al.] // Physical Review Applied. — 2020. — dec. — Vol. 14, no. 6. — P. 064054–1–064054–13. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.064054>.
19. Monolithic hybrid mode-locked 1.3 μm semiconductor lasers / P. A. Morton [et al.] // Applied Physics Letters. — 1990. — jan. — Vol. 56, no. 2. — P. 111–113. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.103046>.
20. Actively mode-locked semiconductor lasers / J. E. Bowers [et al.] // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 1989. — jun. — Vol. 25, no. 6. — P. 1426–1439. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/3.29278>.
21. Transform-limited 1.4 ps optical pulses from a monolithic colliding-pulse mode-locked quantum well laser / M. C. Wu [et al.] // Applied Physics Letters. — 1990. — aug. — Vol. 57, no. 8. — P. 759–761. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.103413>.
22. Sub-picosecond 38 W optical pulses from a hybrid mode locked semiconductor laser system / P. J. Delfyett [et al.] // Ultrafast Phenomena VII. — Springer Berlin Heidelberg, 1990. — P. 78–80. — ISBN: 9783642842696. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-84269-6_25.
23. Delfyett P. J., Silberberg Y., Alphonse G. A. Hot-carrier thermalization induced self-phase modulation in semiconductor traveling wave amplifiers // Applied Physics Letters. — 1991. — jul. — Vol. 59, no. 1. — P. 10–12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.105561>.
24. 200-fs optical pulse generation and intracavity pulse evolution in a hybrid mode-locked semiconductor diode-laser/amplifier system / Peter J. Delfyett [et al.] // Optics Letters. — 1992. — may. — Vol. 17, no. 9. — P. 670. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.17.000670>.

Сведения об авторах:

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


E-mail: zkhrvolly@gmail.com

ORCID iD  0000-0003-4052-3212

Web of Science ResearcherID  ABB-9746-2021

Арина Станиславовна Федотова — студент лица ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: farista2006@mail.ru

ORCID iD  0000-0003-2897-6390

Web of Science ResearcherID  HGB-1329-2022

Original article
PACS 42.25.Bs
OCIS 310.6628
MSC 00A79

Investigation of directed optical emission of quantum dots in nanomaterial

O. N. Zakharova , A. S. Fedotova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted October 9, 2023
Resubmitted October 11, 2023
Published December 12, 2023

Abstract. The physical features of the description of the radiation of a system of quantum dots in a nanomaterial are discussed. It is proposed to use a theoretical model to calculate the intensity of optical radiation from a system of quantum dots in a nanomaterial.

Keywords: quantum dot, nanomaterial, optical radiation, radiation intensity

References

1. Core@Double-shell structured BaTiO₃-polymer nanocomposites with high dielectric constant and low dielectric loss for energy storage application / Liyuan Xie [et al.] // The Journal of Physical Chemistry C. — 2013. — oct. — Vol. 117, no. 44. — P. 22525–22537. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp407340n>.
2. Dielectric, mechanical and thermal properties of all-organic PI/PSF composite films by in situ polymerization / Peng Li [et al.] // e-Polymers. — 2020. — jan. — Vol. 20, no. 1. — P. 226–232. — URL: <https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0020>.
3. Lee Ji-Won, Koh Jung-Hyuk. Enhanced dielectric properties of Ag-doped CCTO ceramics for energy storage devices // Ceramics International. — 2017. — aug. — Vol. 43, no. 12. — P. 9493–9497. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.130>.
4. Flexible hdC-G reinforced polyimide composites with high dielectric permittivity / Xiaojian Liao [et al.] // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. — 2017. — oct. — Vol. 101. — P. 50–58. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.011>.
5. High energy density nanocomposites based on surface-modified BaTiO₃ and a ferroelectric polymer / Philseok Kim [et al.] // ACS Nano. — 2009. — aug. — Vol. 3, no. 9. — P. 2581–2592. — URL: <https://doi.org/10.1021/nn9006412>.
6. Highly foldable PANi@CNTs/PU dielectric composites toward thin-film capacitor application / Wenhui Xu [et al.] // Materials Letters. — 2017. — apr. — Vol. 192. — P. 25–28. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.01.064>.

7. Silicone elastomers with high-permittivity ionic liquids loading / Xue Liu [et al.] // *Advanced Engineering Materials*. — 2019. — aug. — Vol. 21, no. 10. — URL: <https://doi.org/10.1002/adem.201900481>.
8. Radiative energy band gap of nanostructures coupled with quantum emitters around the epsilon-near-zero frequency / Tao Gong [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — aug. — Vol. 106, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.085422>.
9. Bagherian M., Passian A. Quantum states of cylindrical surface charge density for modeling plasmonic circuit elements: Nanowires, nanorods, cavities, and waveguides // *Physical Review A*. — 2022. — jun. — Vol. 105, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.105.063507>.
10. Efficient exciton generation in a semiconductor quantum-dot–metal-nanoparticle composite structure using conventional chirped pulses / Dionisis Stefanatos [et al.] // *Physical Review A*. — 2022. — may. — Vol. 105, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.105.052604>.
11. Perspectives on advances in quantum dot lasers and integration with Si photonic integrated circuits / Chen Shang [et al.] // *ACS Photonics*. — 2021. — aug. — Vol. 8, no. 9. — P. 2555–2566. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/acsp Photonics.1c00707>.
12. Recent developments of quantum dot materials for high speed and ultrafast lasers / Zhonghui Yao [et al.] // *Nanomaterials*. — 2022. — mar. — Vol. 12, no. 7. — P. 1058. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/nano12071058>.
13. Edge emitting mode-locked quantum dot lasers / Amit Yadav [et al.] // *Progress in Quantum Electronics*. — 2023. — jan. — Vol. 87. — P. 100451. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pquantelec.2022.100451>.
14. 1.5- μm indium phosphide-based quantum dot lasers and optical amplifiers: the impact of atom-like optical gain material for optoelectronics devices / Sven Bauer [et al.] // *IEEE Nanotechnology Magazine*. — 2021. — apr. — Vol. 15, no. 2. — P. 23–36. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/MNANO.2020.3048103>.
15. Khan Mohammed Zahed Mustafa, Ng Tien Khee, Ooi Boon S. Self-assembled InAs/InP quantum dots and quantum dashes: material structures and devices // *Progress in Quantum Electronics*. — 2014. — nov. — Vol. 38, no. 6. — P. 237–313. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pquantelec.2014.11.001>.
16. Integration of emission-wavelength-controlled InAs quantum dots for ultra-broadband near-infrared light source / Nobuhiko Ozaki [et al.] // *Nanomaterials and Nanotechnology*. — 2014. — jan. — Vol. 4. — P. 26. — URL: <http://dx.doi.org/10.5772/59315>.
17. Broadband light sources based on InAs/InGaAs metamorphic quantum dots / L. Seravalli [et al.] // *Journal of Applied Physics*. — 2016. — apr. — Vol. 119, no. 14. — P. 143102–1–143102–8. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4945436>.
18. Optical and electronic properties of symmetric InAs/(In, Al, Ga)As/InP quantum dots formed by ripening in molecular beam epitaxy: a potential system for broad-range single-photon telecom emitters / P. Holewa [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2020. — dec. — Vol. 14, no. 6. — P. 064054–1–064054–13. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.064054>.

19. Monolithic hybrid mode-locked 1.3 μm semiconductor lasers / P. A. Morton [et al.] // Applied Physics Letters. — 1990. — jan. — Vol. 56, no. 2. — P. 111–113. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.103046>.
20. Actively mode-locked semiconductor lasers / J. E. Bowers [et al.] // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 1989. — jun. — Vol. 25, no. 6. — P. 1426–1439. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/3.29278>.
21. Transform-limited 1.4 ps optical pulses from a monolithic colliding-pulse mode-locked quantum well laser / M. C. Wu [et al.] // Applied Physics Letters. — 1990. — aug. — Vol. 57, no. 8. — P. 759–761. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.103413>.
22. Sub-picosecond 38 W optical pulses from a hybrid mode locked semiconductor laser system / P. J. Delfyett [et al.] // Ultrafast Phenomena VII. — Springer Berlin Heidelberg, 1990. — P. 78–80. — ISBN: 9783642842696. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-84269-6_25.
23. Delfyett P. J., Silberberg Y., Alphonse G. A. Hot-carrier thermalization induced self-phase modulation in semiconductor traveling wave amplifiers // Applied Physics Letters. — 1991. — jul. — Vol. 59, no. 1. — P. 10–12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.105561>.
24. 200-fs optical pulse generation and intracavity pulse evolution in a hybrid mode-locked semiconductor diode-laser/amplifier system / Peter J. Delfyett [et al.] // Optics Letters. — 1992. — may. — Vol. 17, no. 9. — P. 670. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.17.000670>.

Information about authors:

Olga Nikolaevna Zakharova — 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: zkhrvolly@gmail.com

ORCID iD  0000-0003-4052-3212

Web of Science ResearcherID  ABB-9746-2021

Arina Stanislavovna Fedotova — lyceum 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: farista2006@mail.ru

ORCID iD  0000-0003-2897-6390

Web of Science ResearcherID  HGB-1329-2022

Секция 2

Компьютерные науки и информатика

2.1 Теоретическая информатика

Научная статья

УДК 004.658

ББК 22.343

ГРНТИ 20.53.19

ВАК 2.3.8.

PACS 01.40.Di

OCIS 160.3918

MSC 68P05

Разработка дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей

К. К. Алтунин , И. А. Шарнина  ¹

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

Поступила в редакцию 30 июня 2023 года

После переработки 30 августа 2023 года

Опубликована 12 декабря 2023 года

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

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

¹E-mail: inna_sharnina27@mail.ru

Введение

Работа посвящена разработке дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей.

Целью работы является проектирование дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей.

Задачи исследования:

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

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

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

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

Обзор физических свойств графеновых метаповерхностей

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

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

функциями Грина, а затем выводим приближенные аналитические выражения для моделирования боковых сил отдачи, демонстрируя их явную зависимость от закона дисперсии системы и раскрывая механизмы, которые ими управляют. В частности, доминирующая боковая составляющая силы отдачи возникает из-за дисбаланса импульсов невзаимных поверхностных плазмонов, поддерживаемых платформой. Эта сила может быть на несколько порядков больше, чем другие компоненты силы отдачи, действует только вдоль или против направления внешнего смещения и практически не зависит от направления, поляризации и длины волны падающей плоской волны. Боковые силы отдачи исследуются с использованием графеновых метаповерхностей с дрейфом, платформы, которая также предлагается для сортировки наночастиц в зависимости от их размера. Невзаимные плазмонные системы могут открыть новые возможности для улавливания, связывания и манипулирования наночастицами, а также решить некоторые проблемы, связанные с обычными оптическими пинцетами.

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

В статье [4] показано, что метаповерхности вместе с графеновой плазмоникой стали играть важную роль в контроле излучательной способности в теплотехнике как пассивно, за счёт изменения геометрических параметров и плотности упаковки метаповерхностей, так и активно, за счёт графенового вентилирования или легирования. В статье [4] продемонстрирована плазмонная метаповерхность из связанной системы из графена и нанопроволоки, использующей гибридные локализованные поверхностные плазмонные моды массива нанопроволок и графена. Массив нанопроволок делает гибридную моду поверхностного плазмона локализованной, обеспечивая возбуждение в свободном пространстве. Однослойный графен через вентиль между нижним зеркалом и верхним электродом может активно регулировать спектральную излучательную способность почти на 90%. Кроме того, поверхностные плазмонные моды графена устраняют строгую поляризационную зависимость излучения массива нанопроволок, что приводит к пятикратному увеличению коэффициента излучения p -поляризованного излучения, особенно при больших углах излучения.

Разнообразные оптические границы раздела, обладающие произвольной магнитной и электрической проводимостью поверхности, могут позволить разрабатывать фотонные устройства с новыми функциями, но практических подходов на сегодняшний день не существует. Обычные границы раздела, такие как с графеном, интересны с оптической точки зрения из-за их настраиваемой электропроводности поверхности. Однако

их магнитная поверхностная проводимость незначительна, поскольку магнитный отклик в природных материалах обычно слабый, начиная с терагерцовой частоты. Поиски искусственного магнитного отклика недавно привели к разработке магнитных метаповерхностей, которые, однако, могут обеспечить границу раздела только с ограниченным значением поверхностной магнитной проводимости. В статье [5] обнаружено, что вертикальные гетероструктуры на основе регулярных немагнитных метаповерхностей имеют прямое соответствие оптической границе раздела как с магнитной, так и с электрической поверхностной проводимостью, желаемые значения которых могут быть структурно спроектированы. Кроме того, в статье [5] идентифицируются несколько уникальных фотонных и плазмонных откликов на оптических интерфейсах с удельной магнитной проводимостью поверхности, включая нечувствительный к поляризации эффект Брюстера и чисто магнитные поверхностные волны.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Проведённый обзор литературы показал актуальность исследования физических свойств графеновых метаповерхностей.

Результаты

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

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

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

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

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

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

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

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

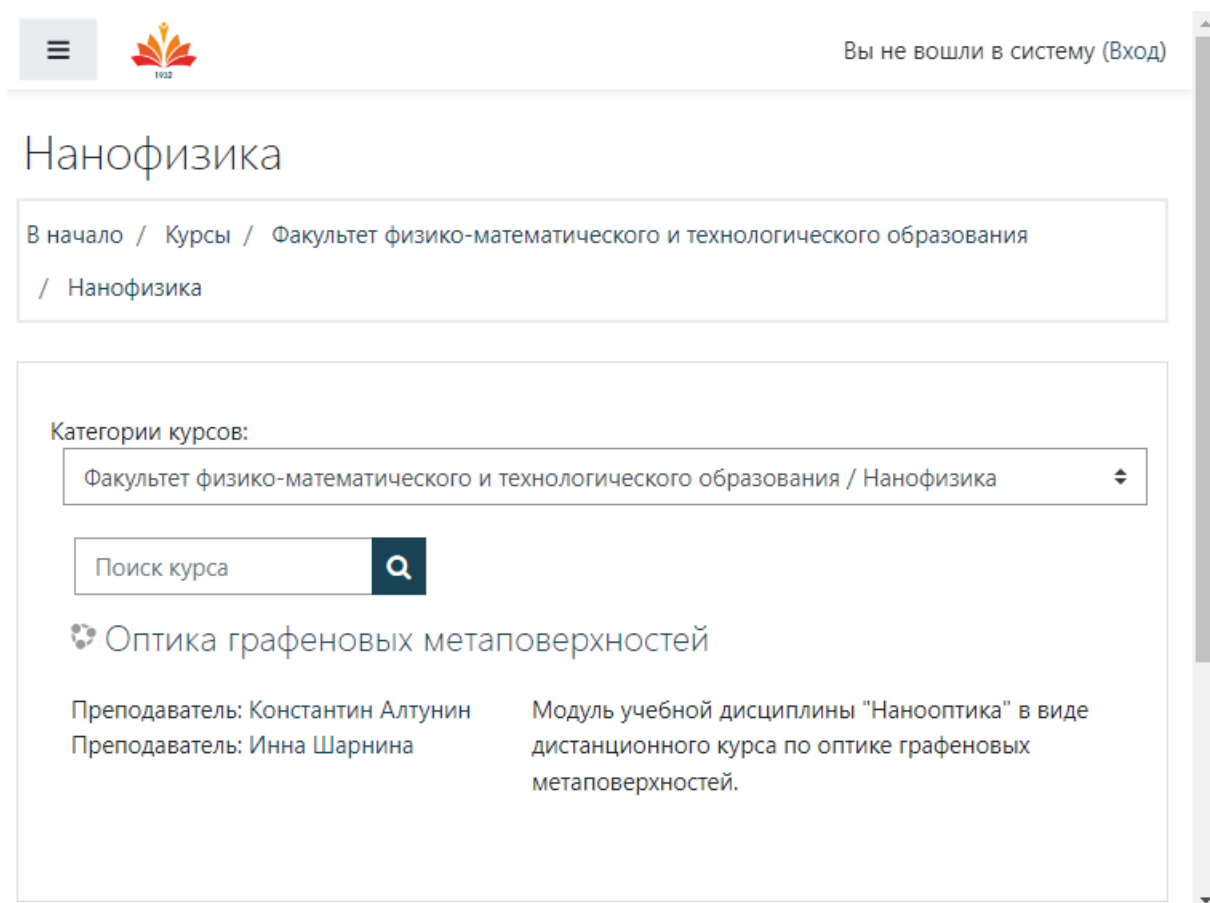


Рис. 1. Входная страница дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

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

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

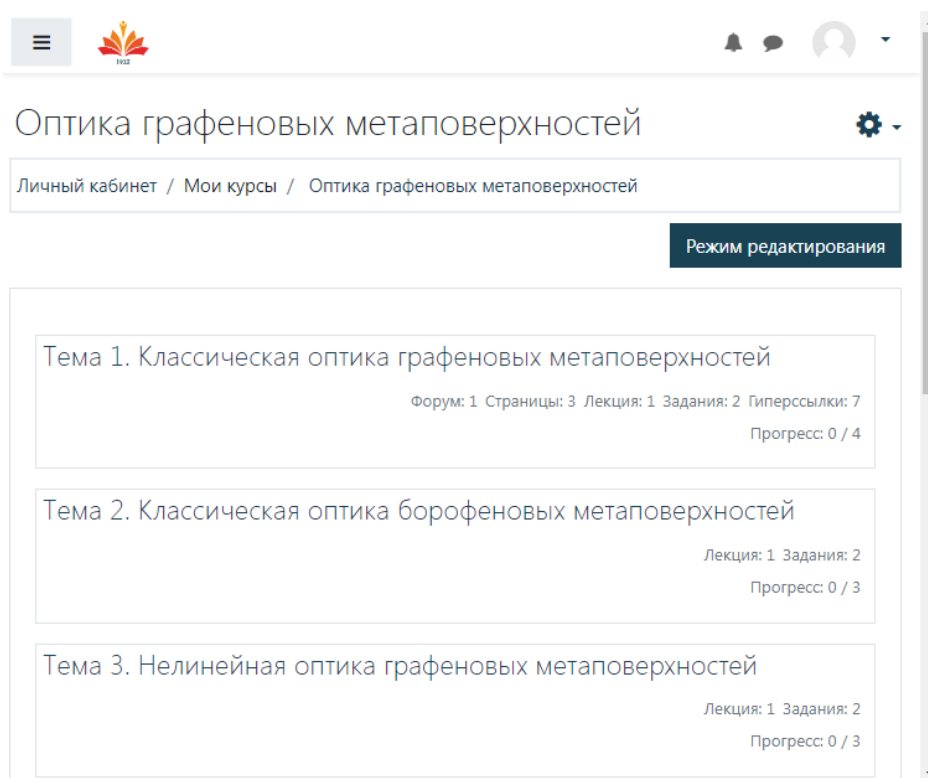


Рис. 2. Страница, содержащая первую часть модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

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

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

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

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

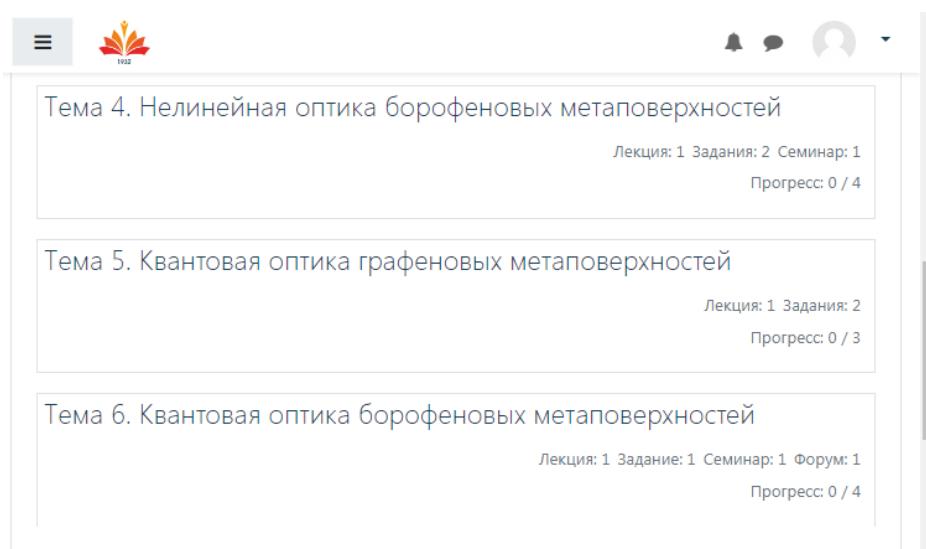


Рис. 3. Страница, содержащая вторую часть модулей дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

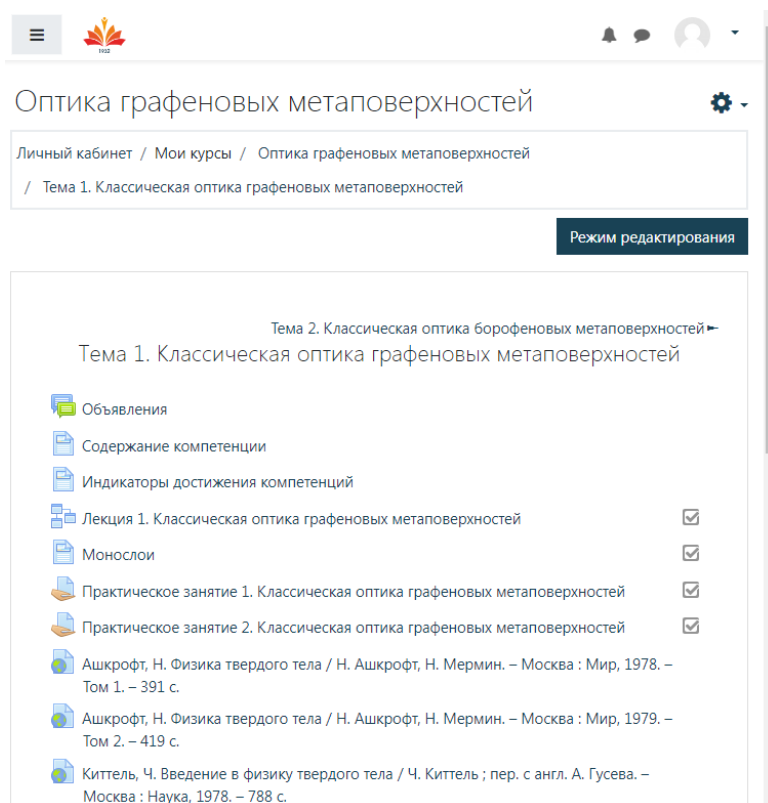


Рис. 4. Страница, содержащая элементы первой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

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

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

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

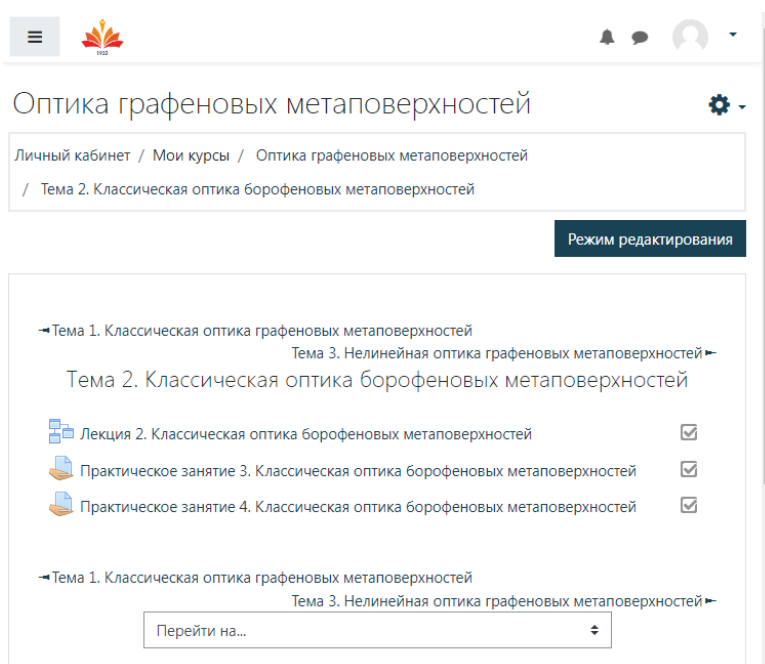


Рис. 5. Страница, содержащая элементы второй темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

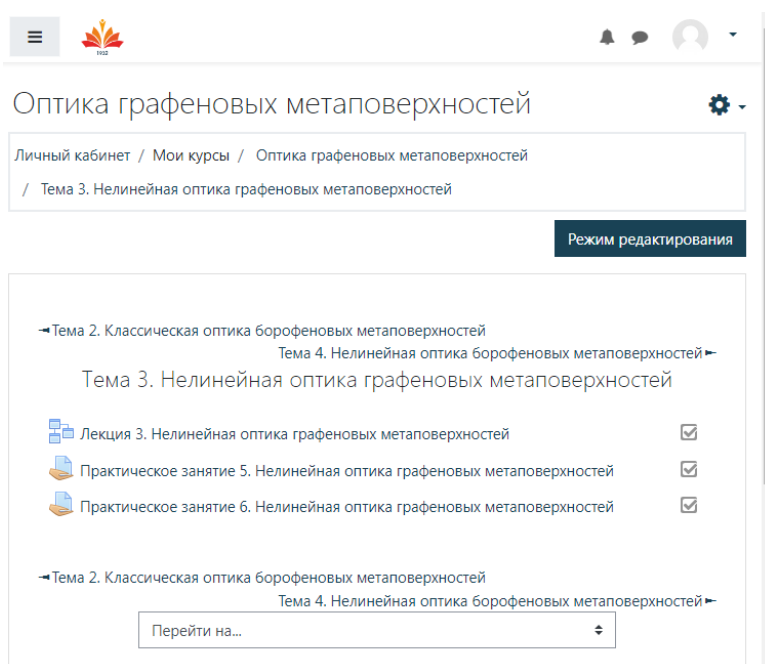


Рис. 6. Страница, содержащая элементы третьей темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

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

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

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

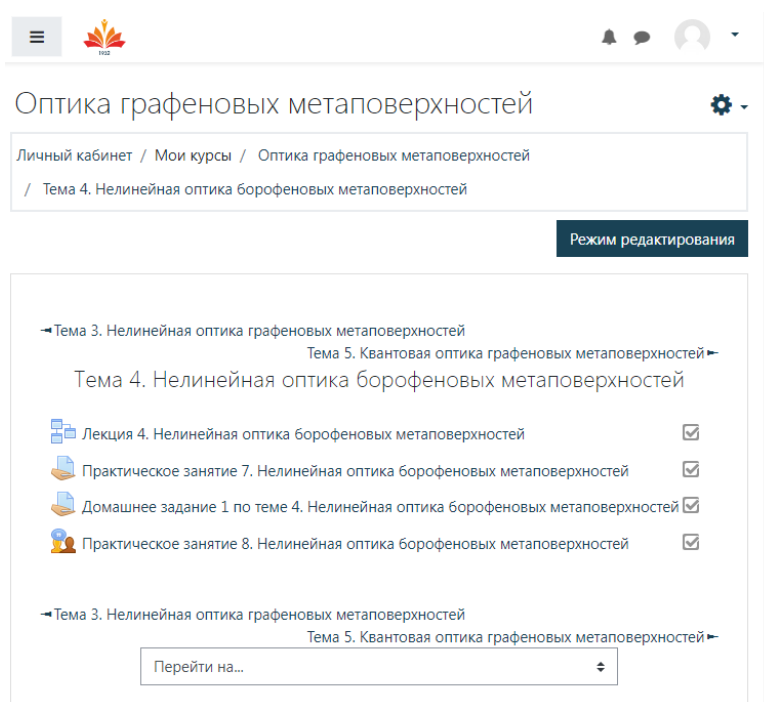


Рис. 7. Страница, содержащая элементы четвёртой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

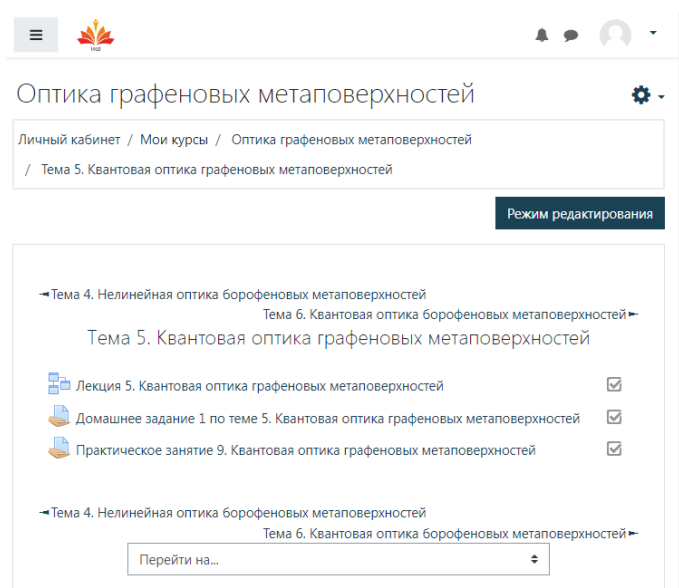


Рис. 8. Страница, содержащая элементы пятой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

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

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

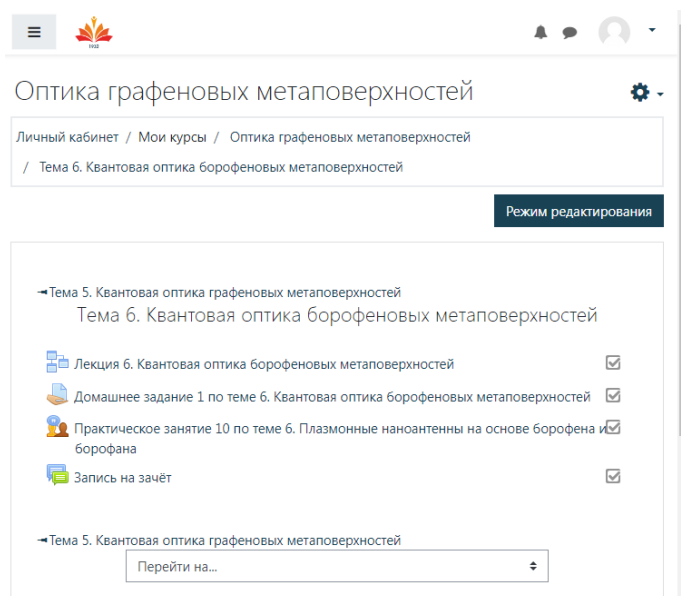


Рис. 9. Страница, содержащая элементы шестой темы дистанционного курса по учебной дисциплине «Оптика графеновых метаповерхностей», созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

Результаты экспертной оценки дистанционного курса по оптике графеновых метаповерхностей

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

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

Эксперт 2 за структуру курса выставил 9 баллов, за интерактивность курса выставил 6 баллов, за навигацию курса выставил 10 баллов, за дизайн курса выставил 6 баллов, за интерфейс курса выставил 7 баллов, за диагностику курса выставил 6 баллов, за организацию самостоятельной работы курса выставил 6 баллов, за соблюдение авторских прав в курсе выставил 10 баллов.

Эксперт 3 за структуру курса выставил 7 баллов, за интерактивность курса выставил 8 баллов, за навигацию курса выставил 7 баллов, за дизайн курса выставил 6 баллов, за интерфейс курса выставил 7 баллов, за диагностику курса выставил 6 баллов, за организацию самостоятельной работы курса выставил 7 баллов, за соблюдение авторских прав в курсе выставил 8 баллов.

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

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

баллов, за интерфейс курса выставил 7 баллов, за диагностику курса выставил 6 баллов, за организацию самостоятельной работы курса выставил 7 баллов, за соблюдение авторских прав в курсе выставил 9 баллов.

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

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

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

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

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

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

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

поверхностей.

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

Заключение

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

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

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

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

Список использованных источников

1. Electron metasurfaces in graphene / Ruihuang Zhao [et al.] // Physical Review B. — 2023. — apr. — Vol. 107, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.155404>.
2. Paul Nayan K., Gomez-Diaz J. Sebastian. Lateral recoil optical forces on nanoparticles near nonreciprocal surfaces // Physical Review B. — 2023. — jan. — Vol. 107, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.035417>.
3. Christopoulos Thomas, Kriezis Emmanouil E., Tsilipakos Odysseas. Multimode non-Hermitian framework for third harmonic generation in nonlinear photonic systems comprising two-dimensional materials // Physical Review B. — 2023. — jan. — Vol. 107, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.035413>.
4. Active control of thermal emission by graphene-nanowire coupled plasmonic metasurfaces / Jiayu Li [et al.] // Physical Review B. — 2022. — sep. — Vol. 106, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.115416>.

5. Optical interface engineering with on-demand magnetic surface conductivities / Yuhan Zhong [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — jul. — Vol. 106, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.035304>.
6. Random Graphene Metasurfaces: Diffraction Theory and Giant Broadband Absorptivity / Andrey Novitsky [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2022. — apr. — Vol. 17, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.17.044041>.
7. Electrically and thermally tunable multifunctional terahertz metasurface array / Yue Wang [et al.] // *Physical Review A*. — 2022. — mar. — Vol. 105, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.105.033520>.
8. Anisotropic radiative heat transfer between nanoparticles mediated by a twisted bilayer graphene grating / Shui-Hua Yang [et al.] // *Physical Review B*. — 2021. — sep. — Vol. 104, no. 12. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.104.125417>.
9. Exceptional points in flat optics: a non-Hermitian line-wave scenario / Massimo Moccia [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2021. — jun. — Vol. 15, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.15.064067>.
10. Enhancement and active mediation of near-field radiative heat transfer through multiple nonreciprocal graphene surface plasmons / Cheng-Long Zhou [et al.] // *Physical Review B*. — 2020. — dec. — Vol. 102, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.102.245421>.
11. Controlling light absorption of graphene at critical coupling through magnetic dipole quasi-bound states in the continuum resonance / Xing Wang [et al.] // *Physical Review B*. — 2020. — oct. — Vol. 102, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.102.155432>.
12. Enhanced near-field radiative heat transport between graphene metasurfaces with symmetric nanopatterns / Yizhi Hu [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2020. — oct. — Vol. 14, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.14.044054>.
13. You Jian Wei, Panoiu Nicolae C. Tunable and dual-broadband giant enhancement of second-harmonic and third-harmonic generation in an optimized graphene-insulator-graphene metasurface // *Physical Review B*. — 2020. — sep. — Vol. 102, no. 12. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.102.121403>.
14. Chiral Plasmons with Twisted Atomic Bilayers / Xiao Lin [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2020. — aug. — Vol. 125, no. 7. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.125.077401>.
15. Amin M., Siddiqui O., Farhat M. Linear and circular dichroism in graphene-based reflectors for polarization control // *Physical Review Applied*. — 2020. — feb. — Vol. 13, no. 2. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.13.024046>.
16. Correas-Serrano D., Gomez-Diaz J. S. Nonreciprocal and collimated surface plasmons in drift-biased graphene metasurfaces // *Physical Review B*. — 2019. — aug. — Vol. 100, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.100.081410>.
17. Metasurface-mediated anisotropic radiative heat transfer between nanoparticles / Yong Zhang [et al.] // *Physical Review B*. — 2019. — aug. — Vol. 100, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.100.085426>.

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

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

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

IstinaResearcherID  66185348

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

E-mail: inna_sharnina27@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-9777-7996

Web of Science ResearcherID  ABI-2941-2020

@auxrussian@auxenglish

Original article
PACS 01.40.Di
OCIS 160.3918
MSC 68P05

Development of a distance course on the optics of graphene metasurfaces

K. K. Altunin , I. A. Sharnina 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

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

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

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

References

1. Electron metasurfaces in graphene / Ruihuang Zhao [et al.] // *Physical Review B*. — 2023. — apr. — Vol. 107, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.155404>.
2. Paul Nayan K., Gomez-Diaz J. Sebastian. Lateral recoil optical forces on nanoparticles near nonreciprocal surfaces // *Physical Review B*. — 2023. — jan. — Vol. 107, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.035417>.
3. Christopoulos Thomas, Kriezis Emmanouil E., Tsilipakos Odysseas. Multimode non-Hermitian framework for third harmonic generation in nonlinear photonic systems comprising two-dimensional materials // *Physical Review B*. — 2023. — jan. — Vol. 107, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.035413>.
4. Active control of thermal emission by graphene-nanowire coupled plasmonic metasurfaces / Jiayu Li [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — sep. — Vol. 106, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.115416>.
5. Optical interface engineering with on-demand magnetic surface conductivities / Yuhan Zhong [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — jul. — Vol. 106, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.106.035304>.
6. Random Graphene Metasurfaces: Diffraction Theory and Giant Broadband Absorptivity / Andrey Novitsky [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2022. — apr. — Vol. 17, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.17.044041>.

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

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

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

Information about authors:

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

E-mail: kostya.altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

IstinaResearcherID  66185348

Inna Alekseevna Sharnina — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: inna_sharnina27@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-9777-7996

Web of Science ResearcherID  ABI-2941-2020

Научная статья
УДК 004.658
ББК 22.343
ГРНТИ 20.01.07
ВАК 2.3.8.
PACS 01.40.Di
OCIS 160.1190
MSC 68P05

Проектирование дистанционного курса по физике мезоскопических систем

В. М. Тимченко  ¹

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

Поступила в редакцию 7 апреля 2023 года
После переработки 12 апреля 2023 года
Опубликована 12 декабря 2023 года

Аннотация. Представлены результаты проектирования структуры тематических модулей курса и избранных элементов дистанционного курса по физике мезоскопических систем в системе управления обучением MOODLE. Приведено описание структуры элементов в виде лекций и элементов для контроля знаний в составе дистанционного курса по физике мезоскопических систем в системе управления обучением MOODLE.

Ключевые слова: курс, дистанционный курс, элемент курса, физика, мезоскопическая система, лекция, контроль знаний

Введение

Актуальность исследования дистанционного курса по физике мезоскопических систем обусловлена тем, что изучение физики мезоскопических систем открывает широкие перспективы для профессиональной подготовки исследователей в области физики, способствует обмену опытом и развитию сотрудничества между образовательными учреждениями и преподавателями в области дистанционного обучения физике мезоскопических систем.

Цель исследования состоит в том, чтобы описать основные принципы проектирования дистанционного курса по физике мезоскопических систем в системе управления обучением MOODLE. Задачей исследования является всестороннее описание процесса проектирования модульной структуры и избранных элементов дистанционного курса по физике мезоскопических систем в системе управления обучением MOODLE для демонстрации преимуществ дистанционного обучения физике мезоскопических систем обусловлена, в том числе доступности и гибкости графика занятий по курсу физики мезоскопических систем, путём создания положительного имиджа курса физики мезоскопических систем.

¹E-mail: lera.tim2002@icloud.com

Объектом исследования является курс физики мезоскопических систем. Предметом исследования является описание особенностей проектирования модульной структуры и избранных элементов дистанционного курса по физике мезоскопических систем в системе управления обучением MOODLE.

Научная новизна исследования состоит в том, что проектирование модульной структуры и избранных элементов дистанционного курса по физике мезоскопических систем происходит с учётом влияния использования различных технологий и методик дистанционного обучения в рамках дистанционного курса на профессиональное развитие студентов в области физики мезоскопических систем.

Гипотеза исследования состоит в том, что если применять элементы дистанционного обучения в курсе физики мезоскопических систем, то можно построить эффективную систему подготовки, которая будет эффективной и привлекательной для аудитории, а дистанционный курс по физике мезоскопических систем имеет ряд преимуществ перед другими формами обучения.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что происходит расширение теоретических знаний по мезоскопическим системам в рамках изучения дистанционного курса, углубление понимания физических процессов в мезоскопических системах и формирования профессиональных компетенций при использовании дистанционного обучения в области физики мезоскопических систем. Практическая значимость исследования состоит в том, что разработка дистанционного курса физики мезоскопических систем способствует внедрению методик и технологий дистанционного обучения для повышения эффективности и качества преподавания курса физики мезоскопических систем на основе опыта дистанционного обучения на основе мотивации студентов и преподавателей к использованию дистанционного обучения в своей профессиональной деятельности.

Обзор

Наномеханика привнесла мезоскопическую физику в мир колебаний. Поскольку наномеханические системы малы, флуктуации значительны, колебания становятся нелинейными уже при сравнительно малых амплитудах колебаний и вступают в действие новые механизмы диссипации. В статье [1] представлен обзор мезоскопической физики наномеханических систем, включая диссипацию, флуктуации и нелинейные явления. В статье [1] обсуждаются теоретические идеи, объяснительные эксперименты и основные приложения в науке и технике. В то же время тонкое управление наномеханическими системами делает их платформой для изучения многих проблем классической и квантовой физики, далеких от теплового равновесия, в хорошо изученной обстановке. В статье [1] на концептуальном уровне описаны основные теоретические идеи и поясняющие эксперименты, относящиеся к мезоскопической физике наномеханических систем. Также обозначены основные применения наномеханики в науке и технике. Широкий спектр явлений, связанных с консервативной, а также диссипативной нелинейностью и флуктуациями, обсуждается в рамках объединяющей структуры. Они включают в себя линейный отклик одиночных и связанных колебательных мод, а также нелинейные эффекты периодического воздействия. Такое движение нарушает симметрию непрерывного перемещения во времени и детальный баланс, что приводит к заметным последствиям для флуктуаций, особенно при наличии бистабильности и мультистабильности, вызванных движением. Математические методы описаны в приложениях для введения в теорию. Непрерывный экспериментальный и теоретический прогресс делает наномеханические системы яркой областью исследований, в которой предстоит открыть множество новых явлений.

В статье [2] обсуждается использование статистического обучения для получения

оптимально прогнозируемого крупнозернистого описания двумерной кинетической модели Изинга ближайшего соседа с динамикой Глаубера.

В статье [3] обсуждается, как мезоскопические системы, в частности небольшие электрические цепи, работающие в квантовом режиме, могут быть использованы для исследования квантового транспорта и внесения вклада в статистическую физику. В статье [3] объясняется значение измерения шума при рассмотрении фундаментальных аспектов физических систем и описывается экспериментальная проверка флуктуационной теоремы в квантовом электронном интерферометре.

В статье [4] обсуждается разработка метода машинного обучения, называемого интеллектуальной диссипативной динамикой частиц, для построения мезоскопических силовых полей непосредственно из микроскопической динамики. В нем конкретно не упоминается изучение физики в мезоскопических системах.

В статье [5] представлен обзор мезоскопической физики и наноэлектроники, включая формулировку квантового транспорта в мезоскопических системах. В статье [5] дан последовательный обзор захватывающих областей и сложных областей исследований в области мезоскопической физики и наноэлектроники. Выявлена объединяющая роль теории S -матрицы или языка квантовой механики «вход–квантовый процесс–выход» в формулировке квантового транспорта в мезоскопической физике и наноэлектронике с применением не зависящей от времени теории S -матрицы к мезоскопическим системам с использованием теории S -матрицы, зависящей от времени по оси времени, в сочетании с решёточной формулировкой квантовой динамики электронов в твёрдых телах Вейля-Вигнера, которая применяется к сильно нелинейным, далеким от равновесия и высокоскоростным наноэлектронным устройствам. В устойчивом состоянии и около равновесия две независимые формулировки дают эквивалентные результаты. Технологическое влияние подхода квантовой функции распределения многих тел (типичным примером которого является функция распределения Вигнера) демонстрируется полным переходом от уровня базовой нелинейной физики квантового транспорта к инженерному инструменту автоматизированного проектирования интегральных схем. Это делается при выводе модели эквивалентной схемы для резонансно-туннельных устройств, включающей квантовую индуктивность. В обзоре [5] особое внимание уделяется основным разработкам в области квантового транспорта, вычислительной наноэлектроники, новым концепциям устройств и новым транспортным физическим явлениям, обнаруженным в небольших структурах, с потенциальными приложениями в устройствах и интегральных схемах, которые, скорее всего, окажут существенное влияние на будущие разработки наноэлектроники.

В статье [6] мезомасштабному моделированию многокомпонентных жидкостей. В статье [6] разработан метод мезоскопического моделирования, основанный на интеграции диссипативной динамики частиц, гидродинамики сглаженных частиц и вычислительной термодинамики. Исследовано кинетическое поведение смешивающихся и несмешивающихся жидкостей. Сила взаимодействия между многокомпонентными мезоскопическими частицами определяется свободной энергией системы. Коэффициент диффузии компонентов в неидеальном растворе определяется химическим потенциалом. Предложенный метод даёт убедительные предсказания влияния конвекции, диффузии и микроскопического взаимодействия на неравновесную эволюцию технических жидкостей и демонстрирует потенциал для моделирования более сложных явлений при обработке материалов.

В статье [7] представлен обзор некоторых интересных результатов в мезоскопической физике, иллюстрирующих нетривиальные идеи квантовой механики. В статье [7] рассмотрены общие принципы дефазировки (иногда называемой «декогеренцией») квантовомеханической интерференции путём связи со степенями свободы окружающей среды.

Затем более подробно обсуждается конкретный недавний пример дефазировки с помощью токопроводящей (неравновесной) системы. Эта система сама по себе является явно квантово-механической, и это ещё одна иллюстрация обнаружения без необходимости в «классических наблюдателях». В статье [7] кратко описывается недавняя проблема, связанная с орбитальным магнитным откликом электронов проводимости (ещё одна явно квантовомеханическая система). Некоторые недавние очень интригующие экспериментальные результаты по гигантской парамагнитной составляющей этого отклика объясняются с помощью особых состояний в нормальном слое.

Запутывание выступает в качестве фундаментального ресурса для многих приложений в квантовой коммуникации. В статье [8] предлагаются и теоретически анализируются методы получения и обнаружения перепутывания спинов электронов в мезоскопической среде. Представленный в статье [8] механизм образования запутанности основан на двух квантовых точках, соединённых со сверхпроводником, из которого спаренные электроны инжектируются посредством андреевского туннелирования. Затем спин-коррелированные электроны могут перепрыгнуть из квантовых точек в нормальные отведения. В статье [8] для обнаружения предлагается измерить дробовой шум, который производят запутанные электроны после того, как они прошли светоделитель. Увеличение шума в два раза оказывается уникальным признаком спинового синглета, максимально запутанного состояния. В другом случае запутанное основное состояние в двух туннельно-связанных квантовых точках обнаруживается посредством осцилляций Ааронова-Бома в котуннельном токе.

В статье [9] описана выдающаяся перспектива современных исследований в области нанофизики. Современные исследования показывают, что эта область активно развивается и полна проблем, которые интересуют самых разных физиков, чьи интересы варьируются от конденсированного состояния до квантовой информации и термодинамики.

В статье [10] описана мезоскопическая система, состоящая из нескольких частиц, которая может претерпевать изменения конфигурации, напоминающие фазовые переходы, но с неуниверсальным поведением. Ярким примером является ориентационное плавление, при котором локализованные частицы с дальнедействующими отталкивающими взаимодействиями, образующими двумерный кристалл, делокализуются по общим замкнутым траекториям. В статье [10] сообщается о наблюдении ориентационного плавления, происходящего в двумерном кристалле, содержащем до 15 ионов. В статье [10] измерены корреляции плотность-плотность, чтобы количественно охарактеризовать процесс плавления, и используем моделирование Монте-Карло для определения угловой кинетической энергии ионов. Добавляя пиннинговую примесь, в статье [10] демонстрируется неуниверсальность ориентационного плавления и создаем новые конфигурации, в которых сосуществуют локализованные и делокализованные частицы. В статье [10] система представляет собой экспериментальный стенд для изучения изменений конфигурации в двумерных мезоскопических системах, а результаты открывают путь к изучению квантовых явлений в ансамблях делокализованных ионов.

Результаты

Опишем результаты разработки модульной структуры и избранных элементов дистанционного курса по физике мезоскопических систем. Общая трудоёмкость курса по физике мезоскопических систем составляет 4 зачётные единицы или 144 часа.

Мезоскопическая физика — это раздел физики конденсированного состояния, который фокусируется на свойствах твёрдых тел в диапазоне размеров, промежуточном между объёмным веществом и отдельными атомами.

Дистанционный курс по физике мезоскопических систем содержит 12 тематических

модулей. Первый модуль посвящён изучению основных особенностей свойств мезоскопических систем и содержит форум, лекцию, семинар. Второй модуль посвящён изучению интерференционные эффекты, межчастичного взаимодействия в мезоскопических системах и содержит лекцию, семинар и задание. Третий модуль посвящён изучению основ теории баллистического транспорта в мезоскопических системах и содержит лекцию, семинар. Четвёртый модуль посвящён изучению эффекта Ааронова–Бома, незатухающих токов и содержит лекцию, семинар. Пятый модуль посвящён изучению кулоновского взаимодействия, зарядовых эффектов, кулоновской блокады в мезоскопических системах и содержит лекцию, семинар и задание. Шестой модуль посвящён изучению эффекта Холла в мезоскопических системах и содержит лекцию, семинар и задание. Седьмой модуль посвящён изучению квантовых состояний экситонов в мезоскопических системах и содержит лекцию, семинар и задание. Восьмой модуль посвящён изучению методов локального исследования электронных и оптических свойств мезоскопических систем, и содержит лекцию, семинар и задание. Девятый модуль посвящён изучению теории сверхпроводимости, физических свойств высокотемпературных сверхпроводников и содержит лекцию, семинар и задание. Десятый модуль посвящён изучению теории магнетизма сильнокоррелированных электронных систем и содержит лекцию, семинар и задание. Одиннадцатый модуль посвящён изучению электронного транспорта в металлах, теории локализации в мезоскопике, и содержит лекцию, семинар и задание. Двенадцатый модуль посвящён изучению макроскопических квантовых систем и содержит лекцию, семинар и чат.

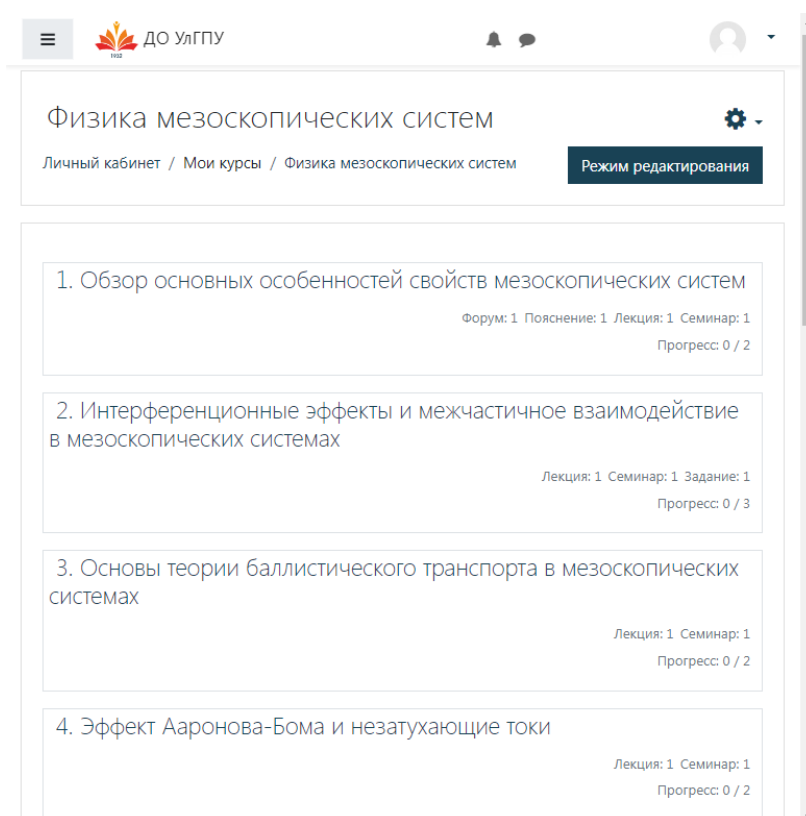


Рис. 1. Первая часть модульной структуры дистанционного курса по физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 1 приведено изображение страницы с первой частью модульной структуры дистанционного курса по физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

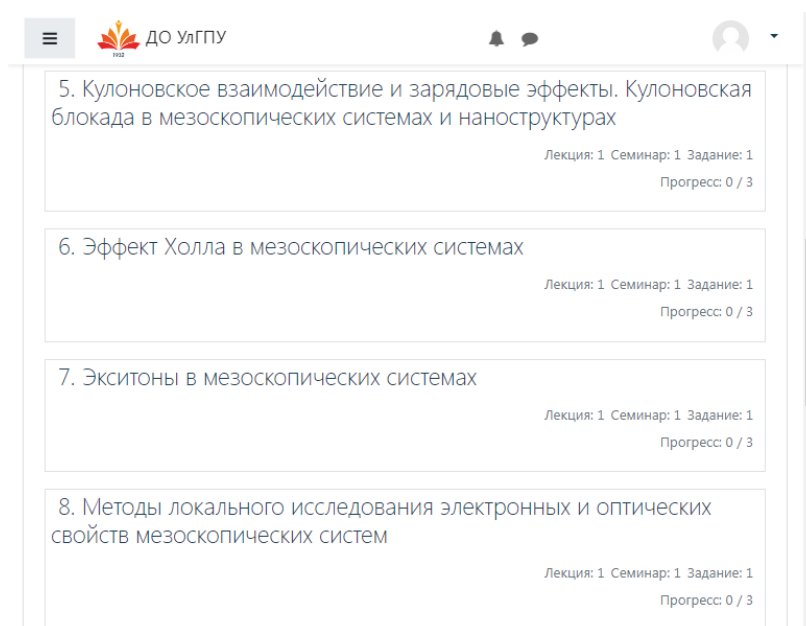


Рис. 2. Вторая часть модульной структуры дистанционного курса по физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы с второй частью модульной структуры дистанционного курса по физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

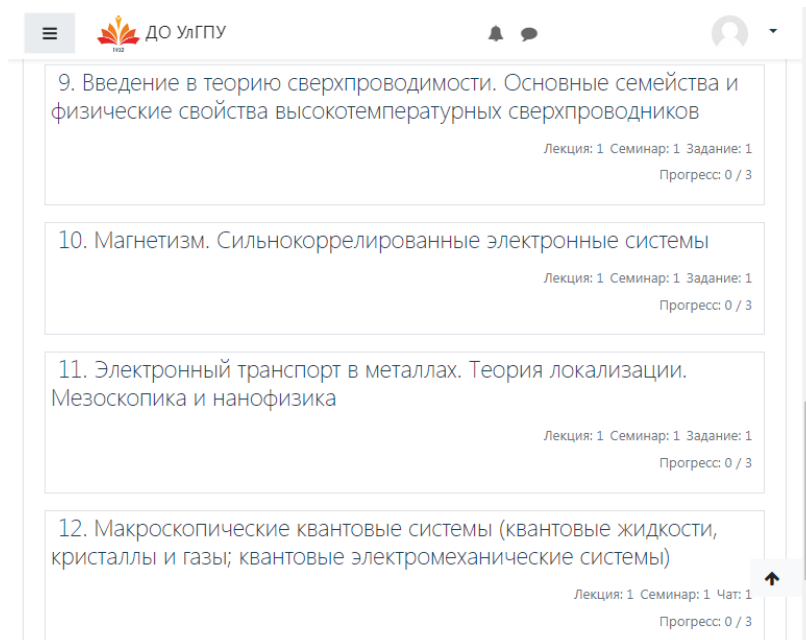


Рис. 3. Третья часть модульной структуры дистанционного курса по физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 приведено изображение страницы с третьей частью модульной структуры дистанционного курса по физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

Дистанционный курс по физике мезоскопических систем содержит 12 элементов

в виде лекций. Первая лекция является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым рассмотрению основных особенностей мезоскопических систем. Вторая лекция является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым рассмотрению интерференционных эффектов и межчастичного взаимодействия в мезоскопических системах. Третья лекция является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым рассмотрению основ теории баллистического транспорта в мезоскопических системах. Четвёртая лекция является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым рассмотрению эффекта Ааронова–Бома и незатухающих токов. Пятая лекция является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым рассмотрению кулоновского взаимодействия и зарядовых эффектов, а также кулоновской блокады в мезоскопических системах и наноструктурах. Шестая лекция является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым рассмотрению эффекта Холла в мезоскопических системах. Седьмая лекция является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым рассмотрению теории квантовых состояний экситонов в мезоскопических системах. Восьмая лекция является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым рассмотрению методов локального исследования электронных и оптических свойств мезоскопических систем. Девятая лекция является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым рассмотрению теории сверхпроводимости и физических свойств высокотемпературных сверхпроводников. Десятая лекция является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым рассмотрению магнетизма сильнокоррелированных электронных систем. Одиннадцатая лекция является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым рассмотрению электронного транспорта в металлах, теории локализации в мезоскопике и нанофизике. Двенадцатая лекция является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым рассмотрению макроскопических квантовых систем таких, как квантовые жидкости, кристаллы и газы; квантовые электромеханические системы.

Дистанционный курс по физике мезоскопических систем содержит 12 элементов в виде семинаров. Первый семинар является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым обсуждению основных особенностей свойств мезоскопических систем. Вторым семинаром является элемент дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым обсуждению интерференционных эффектов и межчастичного взаимодействия в мезоскопических системах. Третий семинар является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым обсуждению основ теории баллистического транспорта в мезоскопических системах. Четвёртый семинар является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым обсуждению эффекта Ааронова–Бома и незатухающих токов. Пятый семинар является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым обсуждению кулоновского взаимодействия и зарядовых эффектов, а также кулоновской блокады в мезоскопических системах и наноструктурах. Шестой семинар является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым обсуждению эффекта Холла в мезоскопических системах. Седьмой семинар является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым обсуждению квантовых состояний экситонов в мезоскопических системах. Восьмой семинар является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвящённым обсуждению методов локального исследования электронных и оптических свойств мезоскопических систем. Девятый семинар является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, по-

священным обсуждению теории сверхпроводимости и физических свойств высокотемпературных сверхпроводников. Десятый семинар является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвященным обсуждению магнетизма сильнокоррелированных электронных систем. Одиннадцатый семинар является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвященным обсуждению электронного транспорта в металлах, теории локализации в мезоскопике и нанофизике. Двенадцатый семинар является элементом дистанционного курса по физике мезоскопических систем, посвященным обсуждению макроскопических квантовых систем на примере квантовых жидкостей, кристаллов и газов; квантовых электромеханических систем.

Заключение

Дистанционное обучение мезоскопической физике является эффективным и привлекательным для студентов, что подтверждается высоким интересом к данному курсу и положительными отзывами обучающихся. Курс обладает рядом преимуществ перед другими формами обучения, такими как гибкость графика, доступность и возможность обучения в удобное время. Технология дистанционного обучения становится всё более популярной и востребованной образовательной технологией в условиях непрерывного развития современных образовательных технологий с учётом возможностей Интернета и видеоконференцсвязи. Технологии дистанционного обучения позволяют успешно использовать их для достижения высоких результатов в изучении физики мезоскопических систем.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если применять элементы дистанционного обучения в курсе физики мезоскопических систем, то можно построить эффективную систему подготовки, которая будет эффективной и привлекательной для аудитории, а дистанционный курс по физике мезоскопических систем имеет ряд преимуществ перед другими формами обучения, подтверждена полностью.

Эффективность дистанционного обучения подтверждается результатами анализа мотивации студентов, уровнем удовлетворенности обучающихся и влиянием курса на профессиональное развитие студентов. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых методик и подходов в обучении, а также для оптимизации учебного процесса в рамках дистанционного курса по физике мезоскопических систем.

Список использованных источников

1. Bachtold Adrian, Moser Joel, Dykman M. I. Mesoscopic physics of nanomechanical systems // *Reviews of Modern Physics*. — 2022. — dec. — Vol. 94, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/revmodphys.94.045005>.
2. Physics-based statistical learning approach to mesoscopic model selection / Soren Taverniers [et al.] // *Physical Review E*. — 2015. — nov. — Vol. 92, no. 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVE.92.053301>.
3. Kobayashi Kensuke. What can we learn from noise? - Mesoscopic nonequilibrium statistical physics // *Proceedings of the Japan Academy, Series B*. — 2016. — Vol. 92, no. 7. — P. 204–221. — URL: <http://dx.doi.org/10.2183/PJAB.92.204>.
4. Ye Ting, Jing Baocai, Pan Dingyi. Intelligent dissipative particle dynamics: Bridging mesoscopic models from microscopic simulations via deep neural networks // *Journal of Computational Physics*. — 2023. — feb. — Vol. 475. — P. 111857. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111857>.

5. Buot Felix A. Mesoscopic physics and nanoelectronics: nanoscience and nanotechnology // *Physics Reports*. — 1993. — nov. — Vol. 234, no. 2–3. — P. 73–174. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/0370-1573\(93\)90097-W](http://dx.doi.org/10.1016/0370-1573(93)90097-W).
6. Zhao Z. C., Moat R. J., Qin R. S. Mesoscale modelling of miscible and immiscible multicomponent fluids // *Scientific Reports*. — 2019. — jun. — Vol. 9, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/S41598-019-44745-8>.
7. Imry Yoseph. Mesoscopic physics and the fundamentals of quantum mechanics // *Physica Scripta*. — 1998. — Vol. T76, no. 1. — P. 171. — URL: <http://dx.doi.org/10.1238/Physica.Topical.076a00171>.
8. Spin-entangled electrons in mesoscopic systems / G. Burkard [et al.] // *Physics-Uspokhi*. — 2001. — oct. — Vol. 44, no. 10S. — P. 126–131. — URL: <http://dx.doi.org/10.1070/1063-7869/44/10S/S28>.
9. Sanchez David, Moskalets Michael. Quantum transport in mesoscopic systems // *Entropy*. — 2020. — sep. — Vol. 22, no. 9. — P. 977. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/e22090977>.
10. Orientational melting in a mesoscopic system of charged particles / Lucia Duca [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2023. — aug. — Vol. 131, no. 8. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.083602>.

Сведения об авторах:

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

E-mail: lera.tim2002@icloud.com

ORCID iD  0009-0006-1685-9612

Web of Science ResearcherID  JRW-5516-2023

Original article
PACS 01.40.Di
OCIS 160.1190
MSC 68P05

Designing a distance course on the physics of mesoscopic systems

V. M. Timchenko 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted April 7, 2023
Resubmitted April 12, 2023
Published December 12, 2023

Abstract. The results of designing the structure of thematic course modules and selected elements of a distance course on the physics of mesoscopic systems in the learning management system MOODLE are presented. A description of the structure of elements in the form of lectures and elements for monitoring knowledge as part of a distance course on the physics of mesoscopic systems in the learning management system MOODLE is provided.

Keywords: course, distance course, course element, physics, mesoscopic system, lecture, knowledge control

References

1. Bachtold Adrian, Moser Joel, Dykman M. I. Mesoscopic physics of nanomechanical systems // *Reviews of Modern Physics*. — 2022. — dec. — Vol. 94, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/revmodphys.94.045005>.
2. Physics-based statistical learning approach to mesoscopic model selection / Soren Taverniers [et al.] // *Physical Review E*. — 2015. — nov. — Vol. 92, no. 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVE.92.053301>.
3. Kobayashi Kensuke. What can we learn from noise? - Mesoscopic nonequilibrium statistical physics // *Proceedings of the Japan Academy, Series B*. — 2016. — Vol. 92, no. 7. — P. 204–221. — URL: <http://dx.doi.org/10.2183/PJAB.92.204>.
4. Ye Ting, Jing Baocai, Pan Dingyi. Intelligent dissipative particle dynamics: Bridging mesoscopic models from microscopic simulations via deep neural networks // *Journal of Computational Physics*. — 2023. — feb. — Vol. 475. — P. 111857. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111857>.
5. Buot Felix A. Mesoscopic physics and nanoelectronics: nanoscience and nanotechnology // *Physics Reports*. — 1993. — nov. — Vol. 234, no. 2–3. — P. 73–174. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/0370-1573\(93\)90097-W](http://dx.doi.org/10.1016/0370-1573(93)90097-W).
6. Zhao Z. C., Moat R. J., Qin R. S. Mesoscale modelling of miscible and immiscible multicomponent fluids // *Scientific Reports*. — 2019. — jun. — Vol. 9, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/S41598-019-44745-8>.

7. Imry Yoseph. Mesoscopic physics and the fundamentals of quantum mechanics // *Physica Scripta*. — 1998. — Vol. T76, no. 1. — P. 171. — URL: <http://dx.doi.org/10.1238/Physica.Topical.076a00171>.
8. Spin-entangled electrons in mesoscopic systems / G. Burkard [et al.] // *Physics-Uspekhi*. — 2001. — oct. — Vol. 44, no. 10S. — P. 126–131. — URL: <http://dx.doi.org/10.1070/1063-7869/44/10S/S28>.
9. Sanchez David, Moskalets Michael. Quantum transport in mesoscopic systems // *Entropy*. — 2020. — sep. — Vol. 22, no. 9. — P. 977. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/e22090977>.
10. Orientational melting in a mesoscopic system of charged particles / Lucia Duca [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2023. — aug. — Vol. 131, no. 8. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.083602>.

Information about authors:

Valeria Maksimovna Timchenko — 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: lera.tim2002@icloud.com

ORCID iD  0009-0006-1685-9612

Web of Science ResearcherID  JRW-5516-2023

Секция 3

Науки об образовании

3.1 Теория и методика обучения и воспитания

Научная статья

УДК 372.853

ББК 74.47

ГРНТИ 14.33.09

ВАК 5.8.2.

PACS 01.40.-d

OCIS 000.2060

MSC 00A79

Элементы организации процесса изучения физики в техническом колледже

А. А. Лебедев  ¹

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

Поступила в редакцию 9 ноября 2023 года

После переработки 16 ноября 2023 года

Опубликована 12 декабря 2023 года

Аннотация. Рассмотрены избранные элементы организации процесса изучения физики в группах по направлению «Автомеханик» и направлению «Сварщик» в техническом колледже. Обсуждаются результаты педагогического эксперимента по физике в 2022 году.

Ключевые слова: методика преподавания физики, физика, педагогический эксперимент

¹E-mail: alexjek73@gmail.com

Введение

Процесс обучения физике направлен на формирование системы знаний, умений и навыков по физике, необходимых для успешного освоения технических дисциплин и профессиональной деятельности. Обучение физике в техническом колледже построено на основе учебных программ и планов, разработанных с учётом требований государственных образовательных стандартов и специфики среднего профессионального образования. Программы включают в себя как теоретические разделы, так и практические занятия, которые позволяют учащимся применять полученные знания на практике. В результате обучения физике в техническом колледже происходит формирование научного мировоззрения, развитие логического и аналитического мышления, освоение основных физических законов и понятий, обучение методам, способам и приёмам решения физических задач, умение применять полученные знания в практической деятельности.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования процесса преподавания физики в технических колледжах, что способствует подготовке высококвалифицированных специалистов, способных к решению сложных профессиональных задач.

Целью работы является исследование организации процесса изучения физики с использованием инновационных методов, форм и средств организации учебного процесса по физике в техническом колледже. Задачи исследования включают в себя обзор существующих подходов к организации учебного процесса по физике, проведение педагогического эксперимента для анализа эффективности использования инновационных методов, форм и средств организации учебного процесса, способствующих повышению качества знаний.

Объектом исследования является образовательный процесс в технических колледжах. Предметом исследования является совокупность инновационных методов, форм и средств организации учебного процесса по физике в техническом колледже.

Научная новизна исследования состоит в том, что обоснована необходимость использования инновационных методов, форм и средств организации учебного процесса по физике в техническом колледже, что позволяет расширить кругозор учащихся, сформировать системное мышление, повысить качество знаний учащихся.

Гипотеза исследования заключается в том, что есть использовать инновационные методы, формы и средства организации учебного процесса по физике в техническом колледже, то можно повысить качество знаний и умений учащихся, а также повысить уровень мотивации к изучению физики, что может существенно увеличить эффективность образовательного процесса по физике в техническом колледже.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что исследование вносит значительный вклад в развитие теории и методики обучения физике в системе среднего профессионального образования. Практическая значимость исследования состоит в том, что результаты исследования могут быть применены при разработке и модернизации учебных программ по физике для технических колледжей.

В качестве методов исследования используется анализ научной литературы по теме исследования, наблюдение за учебным процессом по физике в техническом колледже, контроль знаний для оценки качества знаний учащихся по физике, статистический анализ полученных данных педагогического эксперимента по физике в техническом колледже. В качестве материала исследования используется статистика успеваемости учащихся технического колледжа по физике в 2022 году.

Базой проведения педагогического эксперимента по физике является областное государственное бюджетное общеобразовательное учреждение «Димитровградский технический колледж», расположенное в городе Димитровграде Ульяновской области.

Обзор

Плохая академическая успеваемость студентов технических колледжей вызывает серьезную обеспокоенность исследователей [1]. Использование эффективных методов обучения в технических колледжах повысит успеваемость студентов. Это требует, чтобы преподаватели технических колледжей применяли методы обучения, которые улучшали бы успеваемость студентов по автомеханическим технологиям в технических колледжах. Это требует, чтобы преподаватели технических колледжей применяли методы обучения, которые улучшали бы успеваемость и интерес студентов к технологиям автомеханики в технических колледжах. Были даны ответы на четыре исследовательских вопроса и две нулевые гипотезы были проверены на уровне значимости 0.05. Для исследования был использован квазиэкспериментальный дизайн. В статье [1] представлены результаты исследования, в котором приняли участие 128 студентов автомехаников первого года обучения с национальным техническим сертификатом в государственных технических колледжах. Методика целенаправленной выборки была использована для включения в исследование четырёх школ из шести технических колледжей, в которых обучался 101 студент. Инструментами сбора данных были тест достижений автомехаников и инвентаризация интересов автомехаников. Инструмент был проверен тремя экспертами. Метод повторного тестирования использовался для установления надежности теста достижений автомеханики и рассчитывался с использованием корреляции момента продукта Пирсона, которая дала значение коэффициента корреляции 0.81, а метод коэффициента альфа-надёжности Кронбаха был использован для инвентаризации интересов автомеханики и получено 0.85. Для исследования была проведена лечебная процедура компьютерного обучения и лекционно-демонстрационный метод обучения. Среднее арифметическое и стандартное отклонение использовались для ответа на вопросы исследования, а анализ ковариации использовался для проверки нулевых гипотез. Результаты исследования показали, что студенты, обучавшиеся автомеханике с использованием пакета компьютерных инструкций, достигли значительно более высоких результатов и развили больший интерес, чем те, кто обучался с использованием лекционного метода и демонстрационного метода обучения. По результатам исследования был сделан вывод, что обучение с помощью компьютера положительно влияет на успеваемость студентов и стимулирует интерес к предмету «автомеханика». Более убедительным, эффективным, полезным и ценным оказалось преподавание автомеханики в технических колледжах. Следовательно, было рекомендовано администрации школы предоставить возможности для обучения без отрыва от производства и оборудовать компьютерную лабораторию для преподавателей и учащихся автомеханики, чтобы они могли приобрести компетенции, необходимые для использования компьютерного обучения для преподавания и обучения автомеханике в колледжах.

В статье [2] определено влияние учебных ресурсов модулей инженерной механики на результаты обучения учащихся по предметам механики в профессионально-технической школе. В этом исследовании использовался экспериментальный метод с неэквивалентным дизайном контрольной группы. Используемые планы экспериментальных исследований представляют собой предэкспериментальные планы, настоящие экспериментальные планы, факторные экспериментальные планы и квазиэкспериментальные планы. Результаты этого исследования показывают, что у учащихся экспериментальной группы наблюдается значительный рост успеваемости после использования улучшенных средств обучения.

Результаты педагогического эксперимента

Педагогический эксперимент по физике проводился с 2 сентября 2022 года по 29 октября 2022 года в ОГБОУ «Димитровградский технический колледж» в городе Димитровграде Ульяновской области. В ходе педагогического эксперимента проводились наблюдение и сбор данных педагогического эксперимента в двух группах: А-11, СВ-11. Основную часть учащихся составляют подростки в возрасте от 15 до 16 лет. Программа по физике на учебный год рассчитана на изучение школьной программы десятого и одиннадцатого классов. Занятия по физике в группах проводятся один раз в неделю в виде двух уроков подряд. Программа по физике рассчитана на два часа в неделю.

В группе А-11 по направлению «Автомеханик» обучаются 23 мальчика. Уровень группы средний, так как усвоения материала происходит трудно и занимает больше времени, но хорошо закрепляется.

В группе СВ-11 по направлению «Сварщик» обучаются 24 мальчика и 1 девочка. Учащиеся активно работают на занятии и не стесняются выходить отвечать у доски. В целом группа занимается на высоком уровне.

Педагогический эксперимент проводился в кабинете физики с лаборантской комнатой. В лаборантской комнате храниться физическое оборудование для проведения лабораторных работ по физике. Кабинет физики оборудован тематическими плакатами по физике. В кабинете физики имеется компьютер типа ноутбук для работы с электронным журналом и плазменным телевизором для показа демонстраций по физике. На каждой парте имеется экземпляр учебника по физике.

В 2022-2023 учебном году проводился педагогический эксперимент по преподаванию физики в группе А-11 для выявления особенностей организации процесса преподавания физики в техническом колледже.

Учащийся 1 группы А-11 на входном занятии по физике, проведённом 06.09.2022, по теме «Основы кинематики» отсутствовал и не был аттестован. Учащийся 1 группы А-11 на занятии по физике с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2022, получил отметку «удовлетворительно». Учащийся 1 группы А-11 на занятии по физике с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2022, получил отметку «хорошо». Учащийся 1 группы А-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2022, получил отметку «удовлетворительно». Учащийся 1 группы А-11 на контрольной работе по теме «Законы сохранения в механике», проведённой 27.09.2022, получил отметку «удовлетворительно».

Учащийся 2 группы А-11 на входном занятии по физике, проведённом 06.09.2022, по теме «Основы кинематики» получил отметку «хорошо». Учащийся 2 группы А-11 на занятии по физике с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2022, получил отметку «хорошо». Учащийся 2 группы А-11 на занятии по физике с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2022, получил отметку «хорошо». Учащийся 2 группы А-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2022, получил отметку «хорошо». Учащийся 2 группы А-11 на контрольной работе по теме «Законы сохранения в механике», проведённой 27.09.2022, получил отметку «хорошо».

Учащийся 3 группы А-11 на входном занятии по физике, проведённом 06.09.2022, по теме «Основы кинематики» получил отметку «хорошо». Учащийся 3 группы А-11 на занятии по физике с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2022, получил отметку «хорошо». Учащийся 3 группы А-11 на занятии по физике с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2022, получил отметку «хорошо». Учащийся 3 группы А-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2022,

20.09.2022, получил отметку «хорошо». Учащийся 19 группы А-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2022, получил отметку «хорошо». Учащийся 19 группы А-11 на контрольной работе по теме «Законы сохранения в механике», проведённой 27.09.2022, получил отметку «удовлетворительно».

Учащийся 20 группы А-11 на входном занятии по физике, проведённом 06.09.2022, по теме «Основы кинематики» получил отметку «отлично». Учащийся 20 группы А-11 на занятии по физике с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2022, отсутствовал и не был аттестован. Учащийся 20 группы А-11 на занятии по физике с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2022, получил отметку «отлично». Учащийся 20 группы А-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2022, получил отметку «отлично». Учащийся 20 группы А-11 на контрольной работе по теме «Законы сохранения в механике», проведённой 27.09.2022, получил отметку «отлично».

Учащийся 21 группы А-11 на входном занятии по физике, проведённом 06.09.2022, по теме «Основы кинематики» получил отметку «хорошо». Учащийся 21 группы А-11 на занятии по физике с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2022, получил отметку «хорошо». Учащийся 21 группы А-11 на занятии по физике с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2022, получил отметку «хорошо». Учащийся 21 группы А-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2022, получил отметку «хорошо». Учащийся 21 группы А-11 на контрольной работе по теме «Законы сохранения в механике», проведённой 27.09.2022, получил отметку «хорошо».

Учащийся 22 группы А-11 на входном занятии по физике, проведённом 06.09.2022, по теме «Основы кинематики» получил отметку «хорошо». Учащийся 22 группы А-11 на занятии по физике с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2022, получил отметку «хорошо». Учащийся 22 группы А-11 на занятии по физике с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2022, отсутствовал и не был аттестован. Учащийся 22 группы А-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2022, получил отметку «удовлетворительно». Учащийся 22 группы А-11 на контрольной работе по теме «Законы сохранения в механике», проведённой 27.09.2022, получил отметку «хорошо».

Учащийся 23 группы А-11 на входном занятии по физике, проведённом 06.09.2022, по теме «Основы кинематики» получил отметку «хорошо». Учащийся 23 группы А-11 на занятии по физике с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2022, получил отметку «отлично». Учащийся 23 группы А-11 на занятии по физике с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2022, получил отметку «отлично». Учащийся 23 группы А-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2022, получил отметку «хорошо». Учащийся 23 группы А-11 на контрольной работе по теме «Законы сохранения в механике», проведённой 27.09.2022, получил отметку «отлично».

В результате изучения физики на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 6.09.2023, учащимися группы А-11 были получены следующие отметки: 3 отметки «отлично», 14 отметок «хорошо», 4 отметки «удовлетворительно». Кроме того, 2 человека отсутствовали и были не аттестованы по дисциплине. Абсолютная успеваемость учащихся группы А-11 по физике на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 6.09.2023, составила 91,3 %, что соответствует оптимальному уровню абсолютной успеваемости. Качественная успеваемость учащихся группы А-11

на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 6.09.2023, составила 73.9 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. Степень обученности учащихся группы А-11 по физике на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 6.06.2023, составила 58.8 %, что соответствует допустимому уровню обученности учащихся. Высший уровень требований по физике в группе А-11 на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 6.09.2023, составляет 58.3 %. Средний уровень требований по физике в группе А-11 на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 6.09.2023, составляет 33.0 %. Низкий уровень требований по физике в группе А-11 на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 6.09.2023, составляет 15.1 %. Среднее значение отметок по пятибалльной шкале в группе А-11 на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 6.09.2023, составляет 3.61. Среднее квадратичное отклонение от среднего арифметического значения в группе А-11 на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 6.09.2023, составляет 2.423. Экспериментальное значение хи-квадрат по физике в группе А-11 на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 6.09.2023, составляет 25.913, что больше критического значения, равного 15.08627 для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01. Поэтому методика проведения занятия требует дальнейшего совершенствования.

В результате изучения физики на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2023, учащимися группы А-11 были получены следующие отметки: 1 отметка «отлично», 17 отметок «хорошо», 3 отметки «удовлетворительно». Кроме того, 2 человека отсутствовали и были не аттестованы по дисциплине. Абсолютная успеваемость учащихся группы А-11 по физике на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2023, составила 91.3 %, что соответствует оптимальному уровню абсолютной успеваемости. Качественная успеваемость учащихся группы А-11 на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2023, составила 78.3 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. Степень обученности учащихся группы А-11 по физике на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2023, составила 57.0 %, что соответствует допустимому уровню обученности учащихся. Высший уровень требований по физике в группе А-11 на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2023, составляет 56.3 %. Средний уровень требований по физике в группе А-11 на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2023, составляет 31.5 %. Низкий уровень требований по физике в группе А-11 на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2023, составляет 13.9 %. Среднее значение отметок по пятибалльной шкале в группе А-11 на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2023, составляет 3.57. Среднее квадратичное отклонение от среднего арифметического значения в группе А-11 на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2023, составляет 2.884. Экспериментальное значение хи-квадрат по физике в группе А-11 на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 13.09.2023, составляет 42.869, что больше критического значения, равного 15.08627 для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01. Поэтому методика проведения занятия требует дальнейшего совершенствования.

В результате изучения физики на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2023, учащимися группы А-11 были получены следующие отметки: 3 отметки «отлично», 15 отметок «хорошо», 2 отметки «удовлетворительно». Кроме того, 3 человека отсутствовали и были не аттестованы по дисциплине. Абсолютная успеваемость учащихся группы А-11 по физике на заня-

тии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2023, составила 87.0 %, что соответствует допустимому уровню абсолютной успеваемости. Качественная успеваемость учащихся группы А-11 на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2023, составила 78.3 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. Степень обученности учащихся группы А-11 по физике на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2023, составила 58.8 %, что соответствует допустимому уровню обученности учащихся. Высший уровень требований по физике в группе А-11 на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2023, составляет 57.9 %. Средний уровень требований по физике в группе А-11 на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2023, составляет 33.2 %. Низкий уровень требований по физике в группе А-11 на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2023, составляет 30.7 %. Среднее значение отметок по пятибалльной шкале в группе А-11 на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2023, составляет 3.52. Среднее квадратичное отклонение от среднего арифметического значения в группе А-11 на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2023, составляет 2.574. Экспериментальное значение хи-квадрат по физике в группе А-11 на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 20.09.2023, составляет 30.695, что больше критического значения, равного 15.08627 для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01. Поэтому методика проведения занятия требует дальнейшего совершенствования.

В результате изучения физики на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, учащимися группы А-11 были получены следующие отметки: 3 отметки «отлично», 13 отметок «хорошо», 6 отметок «удовлетворительно». Кроме того, 1 человек отсутствовал и был не аттестован по дисциплине. Абсолютная успеваемость учащихся группы А-11 по физике на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составила 95.7 %, что соответствует оптимальному уровню абсолютной успеваемости. Качественная успеваемость учащихся группы А-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составила 69.6 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. Степень обученности учащихся группы А-11 по физике на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составила 58.9 %, что соответствует допустимому уровню обученности учащихся. Высший уровень требований по физике в группе А-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составляет 58.6 %. Средний уровень требований по физике в группе А-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составляет 32.9 %. Низкий уровень требований по физике в группе А-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составляет 14.8 %. Среднее значение отметок по пятибалльной шкале в группе А-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составляет 3.695. Среднее квадратичное отклонение от среднего арифметического значения в группе А-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составляет 2.307. Экспериментальное значение хи-квадрат по физике в группе А-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составляет 23.739, что больше критического значения, равного 15.08627 для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01. Поэтому

методика проведения занятия требует дальнейшего совершенствования.

В результате изучения физики на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, учащимися группы А-11 были получены следующие отметки: 5 отметок «отлично», 12 отметок «хорошо», 6 отметок «удовлетворительно». Абсолютная успеваемость учащихся группы А-11 по физике на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составила 100.0 %, что соответствует оптимальному уровню абсолютной успеваемости. Качественная успеваемость учащихся группы А-11 на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составила 73.9 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. Степень обученности учащихся группы А-11 по физике на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составила 64.5 %, что соответствует оптимальному уровню обученности учащихся. Высший уровень требований по физике в группе А-11 на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составляет 64.5 %. Средний уровень требований по физике в группе А-11 на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составляет 36.9 %. Низкий уровень требований по физике в группе А-11 на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составляет 17.2 %. Среднее значение отметок по пятибалльной шкале в группе А-11 на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составляет 3.956. Среднее квадратичное отклонение от среднего арифметического значения в группе А-11 на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составляет 2.271. Экспериментальное значение хи-квадрат по физике в группе А-11 на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 27.09.2023, составляет 21.565, что больше критического значения, равного 15.08627 для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01. Поэтому методика проведения занятия требует дальнейшего совершенствования.

В 2022-2023 учебном году проводился педагогический эксперимент по преподаванию физики в группе СВ-11 для выявления особенностей организации процесса преподавания физики в техническом колледже.

Учащийся 1 группы СВ-11 на входном занятии по физике, проведённом 4.09.2023, по теме «Основы кинематики» отсутствовал и не был аттестован по занятию. Учащийся 1 группы СВ-11 на занятии по физике с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 11.09.2023, получил отметку «хорошо». Учащийся 1 группы СВ-11 на занятии по физике с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 18.09.2023, получил отметку «хорошо». Учащийся 1 группы СВ-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, получил отметку «хорошо». Учащийся 1 группы СВ-11 на контрольной работе по теме «Законы сохранения в механике», проведённой 25.09.2023, получил отметку «хорошо».

Учащийся 2 группы СВ-11 на входном занятии по физике, проведённом 4.09.2023, по теме «Основы кинематики» получил отметку «удовлетворительно». Учащийся 2 группы СВ-11 на занятии по физике с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 11.09.2023, получил отметку «хорошо». Учащийся 2 группы СВ-11 на занятии по физике с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 18.09.2023, получил отметку «отлично». Учащийся 2 группы СВ-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, получил отметку «хорошо». Учащийся 2 группы СВ-11 на контрольной работе по теме «Законы сохранения в механике», проведённой 25.09.2023, получил отметку

проведённом 11.09.2023, получил отметку «хорошо». Учащийся 23 группы СВ-11 на занятии по физике с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 18.09.2023, получил отметку «хорошо». Учащийся 23 группы СВ-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, получил отметку «хорошо». Учащийся 23 группы СВ-11 на контрольной работе по теме «Законы сохранения в механике», проведённой 25.09.2023, получил отметку «хорошо».

Учащийся 24 группы СВ-11 на входном занятии по физике, проведённом 4.09.2023, по теме «Основы кинематики» получил отметку «отлично». Учащийся 24 группы СВ-11 на занятии по физике с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 11.09.2023, получил отметку «отлично». Учащийся 24 группы СВ-11 на занятии по физике с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 18.09.2023, получил отметку «отлично». Учащийся 24 группы СВ-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, получил отметку «отлично». Учащийся 24 группы СВ-11 на контрольной работе по теме «Законы сохранения в механике», проведённой 25.09.2023, получил отметку «отлично».

Учащийся 25 группы СВ-11 на входном занятии по физике, проведённом 4.09.2023, по теме «Основы кинематики» получил отметку «хорошо». Учащийся 25 группы СВ-11 на занятии по физике с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 11.09.2023, получил отметку «хорошо». Учащийся 25 группы СВ-11 на занятии по физике с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 18.09.2023, получил отметку «хорошо». Учащийся 25 группы СВ-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, отсутствовал и не был аттестован на занятии. Учащийся 25 группы СВ-11 на контрольной работе по теме «Законы сохранения в механике», проведённой 25.09.2023, получил отметку «хорошо».

В результате изучения физики на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 4.09.2023, учащимися группы СВ-11 были получены следующие отметки: 6 отметок «отлично», 15 отметок «хорошо», 2 отметки «удовлетворительно». Кроме того, 2 человека отсутствовали и не были аттестованы по дисциплине. Абсолютная успеваемость учащихся группы СВ-11 по физике на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 4.09.2023, составила 92.0 %, что соответствует оптимальному уровню абсолютной успеваемости. Качественная успеваемость учащихся группы СВ-11 на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 4.09.2023, составила 84.0 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. Степень обученности учащихся группы СВ-11 по физике на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 4.09.2023, составила 65.8 %, что соответствует оптимальному уровню обученности учащихся. Высший уровень требований по физике в группе СВ-11 на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 4.09.2023, составляет 65.3 %. Средний уровень требований по физике в группе СВ-11 на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 4.09.2023, составляет 38.2 %. Низкий уровень требований по физике в группе СВ-11 на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 4.09.2023, составляет 18.6 %. Среднее значение отметок по пятибалльной шкале в группе СВ-11 на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 4.09.2023, составляет 3.84. Среднее квадратичное отклонение от среднего арифметического значения в группе СВ-11 на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 4.09.2023, составляет 2.540. Экспериментальное значение хи-квадрат по физике в группе СВ-11 на входном занятии по теме «Основы кинематики», проведённом 4.09.2023, составляет 28.8, что больше критиче-

ского значения, равного 15.08627 для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01. Поэтому методика проведения занятия требует дальнейшего совершенствования.

В результате изучения физики на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 11.09.2023, учащимися группы СВ-11 были получены следующие отметки: 5 отметок «отлично», 17 отметок «хорошо», 1 отметка «удовлетворительно». Кроме того, 2 человека отсутствовали и не были аттестованы по дисциплине. Абсолютная успеваемость учащихся группы СВ-11 по физике на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 11.09.2023, составила 92.0 %, что соответствует оптимальному уровню абсолютной успеваемости. Качественная успеваемость учащихся группы СВ-11 на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 11.09.2023, составила 88.0 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. Степень обученности учащихся группы СВ-11 по физике на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 11.09.2023, составила 65.5 %, что соответствует оптимальному уровню обученности учащихся. Высший уровень требований по физике в группе СВ-11 на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 11.09.2023, составляет 65.0 %. Средний уровень требований по физике в группе СВ-11 на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 11.09.2023, составляет 37.9 %. Низкий уровень требований по физике в группе СВ-11 на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 11.09.2023, составляет 18.2 %. Среднее значение отметок по пятибалльной шкале в группе СВ-11 на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 11.09.2023, составляет 3.84. Среднее квадратичное отклонение от среднего арифметического значения в группе СВ-11 на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 11.09.2023, составляет 2.767. Экспериментальное значение хи-квадрат по физике в группе СВ-11 на занятии с самостоятельной работой по теме «Основы кинематики», проведённом 11.09.2023, составляет 38.8, что больше критического значения, равного 15.08627 для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01. Поэтому методика проведения занятия требует дальнейшего совершенствования.

В результате изучения физики на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 18.09.2023, учащимися группы СВ-11 были получены следующие отметки: 5 отметок «отлично», 15 отметок «хорошо», 1 отметка «удовлетворительно». Кроме того, 4 человека отсутствовали и не были аттестованы по дисциплине. Абсолютная успеваемость учащихся группы СВ-11 по физике на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 18.09.2023, составила 84.0 %, что соответствует допустимому уровню абсолютной успеваемости. Качественная успеваемость учащихся группы СВ-11 на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 18.09.2023, составила 80.0 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. Степень обученности учащихся группы СВ-11 по физике на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 18.09.2023, составила 61.0 %, что соответствует допустимому уровню обученности учащихся. Высший уровень требований по физике в группе СВ-11 на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 18.09.2023, составляет 59.8 %. Средний уровень требований по физике в группе СВ-11 на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 18.09.2023, составляет 35.0 %. Низкий уровень требований по физике в группе СВ-11 на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 18.09.2023, составляет 17.0 %. Среднее значение отметок по пятибалльной шкале в группе СВ-11 на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 18.09.2023, составляет

3.52. Среднее квадратичное отклонение от среднего арифметического значения в группе СВ-11 на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 18.09.2023, составляет 2.475. Экспериментальное значение хи-квадрат по физике в группе СВ-11 на занятии с демонстрационным экспериментом по теме «Основы динамики», проведённом 18.09.2023, составляет 28.4, что больше критического значения, равного 15.08627 для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01. Поэтому методика проведения занятия требует дальнейшего совершенствования.

В результате изучения физики на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, учащимися группы СВ-11 были получены следующие отметки: 6 отметок «отлично», 14 отметок «хорошо», 2 отметки «удовлетворительно». Кроме того, 3 человека отсутствовали и не были аттестованы по дисциплине. Абсолютная успеваемость учащихся группы СВ-11 по физике на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составила 88.0 %, что соответствует допустимому уровню абсолютной успеваемости. Качественная успеваемость учащихся группы СВ-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составила 80.0 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. Степень обученности учащихся группы СВ-11 по физике на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составила 63.6 %, что соответствует допустимому уровню обученности учащихся. Высший уровень требований по физике в группе СВ-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составляет 62.7 %. Средний уровень требований по физике в группе СВ-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составляет 36.8 %. Низкий уровень требований по физике в группе СВ-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составляет 17.9 %. Среднее значение отметок по пятибалльной шкале в группе СВ-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составляет 3.68. Среднее квадратичное отклонение от среднего арифметического значения в группе СВ-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составляет 2.402. Экспериментальное значение хи-квадрат по физике в группе СВ-11 на занятии обобщающего повторения по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составляет 24.0, что больше критического значения, равного 15.08627 для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01. Поэтому методика проведения занятия требует дальнейшего совершенствования.

В результате изучения физики на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, учащимися группы СВ-11 были получены следующие отметки: 7 отметок «отлично», 16 отметок «хорошо», 2 отметки «удовлетворительно». Абсолютная успеваемость учащихся группы СВ-11 по физике на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составила 100.0 %, что соответствует оптимальному уровню абсолютной успеваемости. Качественная успеваемость учащихся группы СВ-11 на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составила 92.0 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. Степень обученности учащихся группы СВ-11 по физике на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составила 71.8 %, что соответствует оптимальному уровню обученности учащихся. Высший уровень требований по физике в группе СВ-11 на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составляет 71.9 %. Средний уровень требований по физике в группе СВ-11 на занятии с контрольной работой по

теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составляет 42.2 %. Низкий уровень требований по физике в группе СВ-11 на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составляет 20.6 %. Среднее значение отметок по пятибалльной шкале в группе СВ-11 на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составляет 4.2. Среднее квадратичное отклонение от среднего арифметического значения в группе СВ-11 на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составляет 2.757. Экспериментальное значение хи-квадрат по физике в группе СВ-11 на занятии с контрольной работой по теме «Законы сохранения в механике», проведённом 25.09.2023, составляет 36.8, что больше критического значения, равного 15.08627 для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01. Поэтому методика проведения занятия требует дальнейшего совершенствования.

Заключение

Изучение элементов организации процесса изучения физики в технических колледжах является актуальной и важной темой, поскольку от эффективности используемых методов, форм и средств обучения зависит качество знаний учащихся и их готовность к будущей профессиональной деятельности.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что есть использовать инновационные методы, формы и средства организации учебного процесса по физике в техническом колледже, то можно повысить качество знаний и умений учащихся, а также повысить уровень мотивации к изучению физики, что может существенно увеличить эффективность образовательного процесса по физике в техническом колледже, подтверждена полностью.

Результаты исследования также могут быть использованы для совершенствования учебных программ и методик обучения в технических колледжах. Проведенное исследование позволит разработать новые подходы к организации учебного процесса по физике, оценить эффективность используемых методов и предложить рекомендации по их оптимизации.


Список использованных источников

1. Eze T. I., Ezenwafor J. I., Onwusa S. Ch. Effect of computer-assisted instruction on students' academic achievement and retention of auto-mechanics technology in technical colleges // *The International Journal of Humanities and Social Studies*. — 2020. — jul. — Vol. 8, no. 7. — URL: <http://dx.doi.org/10.24940/theijhss/2020/v8/i7/HS2007-009>.
2. Nurhadiyanto D., Widiyastuti M. F., Pratiwi H. The influence of improved engineering mechanic module in vocational high school // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2020. — jan. — Vol. 1446, no. 1. — P. 012024. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1446/1/012024>.

Сведения об авторах:

Алексей Александрович Лебедев — студент магистратуры факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия; учитель физики областного государственного бюджетного общеобразовательного учреждения «Димитровградский технический колледж», Димитровград, Россия.

E-mail: alexjek73@gmail.com

ORCID iD  0000-0002-0432-6409

Web of Science ResearcherID  AFN-9300-2022

Original article
PACS 01.40.-d
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Elements of organizing the process of studying physics in a technical college

A. A. Lebedev 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted November 9, 2023
Resubmitted November 16, 2023
Published December 12, 2023

Abstract. Selected elements of organizing the process of studying physics in groups in the direction of “Car mechanic” and the direction of “Welder” in a technical college are considered. The results of a pedagogical experiment in physics in 2022 are discussed.

Keywords: methodology of teaching physics, physics, pedagogical experiment


References

1. Eze T. I., Ezenwafor J. I., Onwusa S. Ch. Effect of computer-assisted instruction on students' academic achievement and retention of auto-mechanics technology in technical colleges // The International Journal of Humanities and Social Studies. — 2020. — jul. — Vol. 8, no. 7. — URL: <http://dx.doi.org/10.24940/theijhss/2020/v8/i7/HS2007-009>.
2. Nurhadiyanto D., Widiyastuti M. F., Pratiwi H. The influence of improved engineering mechanic module in vocational high school // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — jan. — Vol. 1446, no. 1. — P. 012024. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1446/1/012024>.

Information about authors:

Alexey Alexandrovich Lebedev — 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; Physics teacher at the regional state budgetary educational institution “Dimitrovgrad Technical College”, Dimitrovgrad, Russia.

E-mail: alexjek73@gmail.com

ORCID iD  0000-0002-0432-6409

Web of Science ResearcherID  AFN-9300-2022

Научная статья
УДК 372.853
ББК 74.5
ГРНТИ 14.33.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.-d
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Организация систематического контроля знаний по физике в классах коррекционного-развивающего обучения

Е. С. Фролова  ¹

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

Поступила в редакцию 7 ноября 2023 года

После переработки 12 ноября 2023 года

Опубликована 12 декабря 2023 года

Аннотация. Рассматриваются вопросы организации контроля знаний по избранной теме курса физики в классах коррекционного-развивающего обучения в школе-интернате. Представлены результаты педагогического эксперимента по теме, связанной с изучением давления твёрдых тел, в классах коррекционного-развивающего обучения в школе-интернате.

Ключевые слова: коррекционного-развивающее обучение, обучение физике, физика, контроль знаний, оценка знаний, проверка знаний, система контроля знаний, давление твёрдых тел

Введение

Обеспечение системы контроля и оценки знаний требует от педагога выполнить условие результативности учебного процесса в классах коррекционно-развивающего обучения. Контроль знаний учащихся является одним из важных этапов в процессе обучения физике. Он позволяет определить уровень усвоения знаний, умений и навыков по физике, а также выявить пробелы в знаниях для последующей их коррекции. В классах коррекционно-развивающего образования контроль знаний по физике имеет особое значение, так как он способствует развитию личности ученика, его адаптации к социальной среде и успешной интеграции в общество. Актуальность исследования состоит в том, что проверка и оценка достижения учащихся составляют важную часть учебного процесса, способствуют повышению качества обучения и воспитания учебного процесса в классах коррекционно-развивающего обучения.

Целью работы является исследование системы контроля и проверки знаний, умений, навыков по физике в образовательном процессе классов коррекционно-развивающего обучения в школе-интернате, различных методов и форм проверки знаний в процессе

¹E-mail: frolovaev28@gmail.com

изучении физики, их недостатки и преимущества. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: проанализировать научно-методическую литературу по выбранной проблеме исследования, определив основные функции проверки знаний в процессе изучения физики, классификации проверки и особенности оценки достижений учащимися целей обучения физики в классах коррекционно-развивающегося; разработать и реализовать формы и методы контроля знаний, умений и навыков у учащихся коррекционной школы с нозологиями: нарушения зрения и ограниченными возможностями здоровья.

Важной задачей развития системы коррекционной работы является отработка механизма продуктивной педагогической деятельности по реализации целей, чтобы все члены педагогического коллектива чётко выполняли работу в соответствии с делегированными им обязанностями и планом. Обеспечение способов, средств для всех участников педагогического процесса является важнейшей задачей руководства школы-интерната.

Объектом исследования является контроль, проверка и оценка достижений, умений и навыков школьников на уроках физики в классах коррекционно-развивающего обучения в школе-интернате. Предметом исследования является процесс контроля знаний учащихся классов коррекционно-развивающего обучения по физике в школе-интернате с использованием различных методов и форм проверки знаний и умений учащихся с ограниченными возможностями здоровья, а также влияние процесса контроля знаний на успеваемость и развитие учеников.

Научная новизна исследования состоит в том, что исследование представляет собой апробацию новых методик контроля знаний по физике, позволяющих определить наиболее оптимальные задания по физике для классов коррекционно-развивающего обучения для школ-интернатов.

Гипотеза исследования состоит в том, что если организовать эффективную систему контроля знаний по физике в классах коррекционно-развивающего образования, то это будет способствовать повышению успеваемости учащихся, их мотивации к обучению физике и развитию личностных качеств.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что разработка и внедрение новых методик и подходов к контролю знаний по физике может способствовать улучшению качества обучения физике в классах коррекционно-развивающего обучения, а также результаты исследования могут быть использованы для оптимизации процесса обучения физике в классах коррекционно-развивающего обучения с учётом опыта организации контроля знаний по физике в классах коррекционно-развивающего обучения.

Практическая значимость исследования состоит в том, что внедрение результатов исследования на основе новых методик и технологий контроля знаний по физике в практику работы школ-интернатов коррекционно-развивающего типа позволит улучшить качество контроля знаний по физике, повысить эффективность учебного процесса, способствовать мотивации учащихся к обучению, развитию их творческих способностей и адаптации к социальной среде.

Обзор

Для активизации познавательной деятельности учащихся на занятиях необходимо учесть ряд факторов, способствующих этому процессу. К таким факторам относятся: фактор новизны, фактор занимательности, фактор актуальности, фактор конфликтности. Учитель должен уметь сделать процесс обучения и эффективным, и интересным для детей. Систематические контролирующие мероприятия в классах коррекционно-развивающего обучения позволяют оценить качество сформированности комплексных умений учащихся.

Содержание преподавания, влияет на то, чему учащиеся могут научиться, и поэтому

может рассматриваться как аспект власти. В статье [1] анализируются аспекты власти в преподавании физики, определяя действия, которые направляют или направляют действия других людей, а затем анализируем сходства и различия в разных классах с точки зрения того, как организовано управление и какие потенциальные последствия это может иметь. Анализ проводится на основе данных о занятиях в классе, документированных с помощью видеозаписей и полевых записей, в трёх младших классах средней школы в восьмом классе и девятом классе соответственно. На первый взгляд, учителя всех трёх школ придерживаются традиционной трактовки учебной программы по физике. Но более глубокий анализ показывает, что учащимся в разных классах предоставляются совершенно разные возможности участвовать в преподавании и создавать отношения с содержанием. То, что кажется желательным способом действия, предлагает различные условия для создания смысла. Во всё более индивидуализированном обществе, где люди должны быть активными, размышляющими и делать выбор ради собственного блага, учащимся в этих трёх классах предлагаются совершенно разные условия для практики и обучения, участия в создании знаний, соединения содержания физики с свою повседневную жизнь и проявлять осознанную гражданственность.

Организация образовательных целей играет важную роль в процессе разработки учебной программы, поскольку она позволяет упорядочить образовательный опыт. В статье [2] предложена структура формального представления образовательных целей, которая позволит оценить организацию образовательных целей. Модель основана на онтологии предметной области, таксономии Блума и организации целей в пространстве знаний, основанном на компетенциях. Модель проверена на тематическом исследовании, в котором оцениваются достижения учащихся в области «Решения по химии» путём проведения неформального теста знаний на группе из 199 14-летних учащихся начальных школ Республики Сербия. Результаты, полученные в результате обучения кейсовым методом, ясно указывают на необходимость включения оценки достижений студентов в организацию образовательных задач. Предложенная модель позволяет оценить организацию образовательных целей, которую в дальнейшем можно использовать для итеративного уточнения организации образовательных целей. Объём существующих знаний и их быстрое развитие находятся в противоречии с ограниченностью учебного времени, умственными и физическими способностями учащихся, что требует тщательного планирования учебного процесса. При этом определение целей чрезвычайно важно, поскольку оно направляет всю остальную деятельность и позволяет определить, в какой степени запланированные мероприятия реализуются.

В конструктивистской литературе существуют три основных подхода к роли, которую предварительные знания детей играют в изучении физики и в развитии зрелых научных взглядов: знания как теория, знания как элементы и знания как система. Первый определяет предварительные знания детей в терминах наивных теорий, которые неверны, но демонстрируют достаточную последовательность, чтобы противостоять реструктуризации. С этой точки зрения, цель физического образования состоит в том, чтобы найти способы вытеснить наивные теории детей и эффективно заменить их научными концепциями. Во втором подходе предварительные знания интерпретируются как разрозненная карта элементов знаний, которые дети развивают самостоятельно на основе предыдущего повседневного опыта. В отличие от первой версии, вторая подчеркивает, что такие элементы знания в основном верны, но им не хватает связной системы отношений, которая могла бы их правильно связать. С этой точки зрения ожидается, что физическое образование превратит существующие элементы знаний детей в последовательные наборы научных убеждений. Третий подход определяет предварительные знания более сложным образом. Представление о знании как системе подчеркивает ряд динамических и разнородных свойств, которыми, по-видимому, обладает большинство

детских представлений о природе. С этой точки зрения, детские наивные идеи проявляют характеристики как знаний как теории, так и знаний как элементов, поэтому задача физического образования состоит в том, чтобы рассматривать каждую характеристику дифференцированно и с помощью адекватных инструментов. Принимая это во внимание, основная цель настоящей статьи состоит в том, чтобы оценить конструктивистские представления о предшествующих знаниях детей с точки зрения прагматического, основанного на фактических данных подхода к изучению научных концепций, то есть какая из этих точек зрения убедительно подтверждается эмпирическими исследованиями в области физического образования и что должны понять о знаниях детей на основе эмпирических исследований научной практики в классе [3].

Методы и материалы

В качестве методов исследования используется наблюдение за процессом контроля знаний на уроках физики в классах коррекционно-развивающего обучения.

В качестве материалов исследования выбраны данные об успеваемости учащихся классов коррекционно-развивающего обучения по избранной теме из курса физики.

Одним из основных механизмов реализации коррекционной работы является оптимально выстроенное взаимодействие специалистов школы-интерната, обеспечивающее системное сопровождение обучающихся специалистами различного профиля. Такое взаимодействие включает следующие компоненты: комплексность в определении и решении проблем ребёнка, предоставлении ему квалифицированной помощи специалистами разного профиля; многоаспектный грамотный анализ всеми специалистами личностного и познавательного развития ребёнка; составление комплексных индивидуальных программ коррекции отдельных сторон учебно-познавательной, речевой, эмоционально-волевой и личностной сфер ребёнка. Консолидация усилий всех имеющихся специалистов в области психологии, педагогики, медицины, социальной работы позволяет обеспечивать систему комплексного психолого-педагогического сопровождения и эффективно решать многие проблемы развития и социализации обучающихся школы-интерната. В качестве ещё одного механизма реализации коррекционной работы следует обозначить социальное партнёрство, которое предполагает профессиональное взаимодействие образовательного учреждения с внешними ресурсами: сотрудничество с дошкольными организациями, средними образовательными учреждениями по вопросам преемственности обучения, развития, адаптации, социализации, здоровьесбережения и интеграции обучающихся; сотрудничество муниципальным или региональным центром социальной защиты; сотрудничество со средствами массовой информации муниципального уровня.

Система контроля знаний по физике в коррекционно-развивающем обучении физике включает в себя индивидуальный подход к каждому ученику с учётом особенностей и потребностей каждого учащегося, разработка индивидуальных заданий и методов контроля знаний. Система контроля знаний по физике в коррекционно-развивающем обучении физике включает в себя систематичность и регулярность контроля знаний физике, сочетающая проведение контрольных работ, тестов, зачётов на протяжении всего учебного года, что позволяет отслеживать динамику развития учащихся. Система контроля знаний по физике в коррекционно-развивающем обучении физике включает в себя разнообразие форм и методов контроля: использование разных типов заданий (тесты, практические работы, творческие задания), что способствует мотивации учащихся и повышению эффективности контроля знаний. Система контроля знаний по физике в коррекционно-развивающем обучении включает в себя объективность и справедливость оценивания с использованием чётких критериев оценки, с учётом всех аспектов деятельности ученика для обеспечения прозрачности и открытости оценивания.

Рассмотрим подробнее обучающую функцию проверки применительно к физике как школьному предмету. Первый раз преподаватель физики проверяет закрепление новых знаний сразу же после их объяснения. Его внимание обращено на понимание и усвоение главного, важного в материале, на этом основном и заостряется внимание школьников. На данном этапе проверки учитель не только изучает знания школьников, но и учит их умению выделять в изученном основное, главное, умению производить сортировку теоретического материала по физике. В процессе проверки выделяется структура учебного материала. Так, к примеру, на уроке было введено понятие силовой характеристики электрического поля, необходимости введения этой физической величины, методик определения её численного значения, единиц. По мере постановки учителем вопросов выявляется самое основное в разобранном материале.

Довольно нередко с целью проверки осознания объяснённого материала преподаватель предлагает рассказать о каком-то одном вопросе. При этом наряду с контролирующей функцией реализуется ещё, и функция обучающая, например, отвечая, учащиеся обучаются логично и поочередно излагать свои знания, доказывать и обосновывать сказанное, подключать в рассказ демонстрацию физических экспериментов и их объяснение. В зависимости от цели рассказа, установленной преподавателем, ученики будут по-разному излагать личный ответ.

Для реализации рассмотренных функций проверки и учёта знаний и умений учащихся нужно гарантировать объективность, полноту и регулярность проверки и учета, что производится, в случае если проверка плановая. Под объективностью проверки понимается такая её постановка, при которой устанавливаются истинные, объективно существующие знания школьников по проверяемым задачам программы. Как демонстрируют исследования, полнота проверки нередко учителями не исполняется, многие стороны знания не подвергаются проверке.

К примеру, не проверяется умение выносить новые знания в уже изученную ситуацию и применять уже изученное в новой ситуации, но сформированность этого умения содействует развитию мышления учащихся, более глубочайшему пониманию взаимосвязи изучаемых на уроках физики явлений, даёт сокращение времени на изучение физических явлений.

Необходимость проверки умения переноса новых знаний в уже изученную ситуацию обусловлена также тем, что в школьном курсе физики отдельные темы и вопросы изучаются только в седьмых и восьмых классах. Это приводит к тому, что новые знания, полученные позднее, не увязываются со старыми. У школьников не формируется целостное представление о ряде вопросов физики. Поэтому важно в процессе проверки предлагать ребятам задания, при выполнении которых они могли бы применять, использовать новые знания для решения старой, уже известной физической задачи.

Проверка играет стимулирующую роль, в случае если исполняется регулярно, показывает школьникам достоинства и недостатки их знаний, происходит на каждом уроке: все учащиеся класса обязаны слушать вызванного ученика и выговаривать собственные замечания по его ответу. Стимулом труда считается объективная его оценка.

Функции проверки проявляются в отдельных этапах процесса обучения в разной степени. За проверкой нельзя признать лишь контролирующую функцию, так как к моменту проверки формирование знаний еще не завершено, что обусловлено как возрастными и индивидуальными особенностями учащихся, так и определенными закономерностями самого процесса формирования знаний.

Признание за проверкой лишь какой-то одной функции приводит к искажению природы проверки, делает её односторонней. Только при гармоничном сочетании контролирующей, обучающей, ориентирующей и воспитывающей функций выполняется назначение проверки как этапа обучения. Естественно, что функции проверки на различных

этапах процесса обучения проявляются в разной степени.

За основу возьмём известные в методической литературе классификации, в качестве основания по месту контроля знаний в процессе обучения: предварительный контроль знаний, текущий контроль знаний, тематический контроль знаний, итоговый контроль знаний, так по характеру получения информации в классах коррекционно-развивающего обучения: устный, письменный, практический. Для начала представим характеристики и задачи системы контроля в выбранной классификации. Особенно это важно в классах коррекционно-развивающего обучения.

Характеристики предварительного контроля знаний в процессе обучения физике определяют исходный уровень компетентности учащихся. Задачами предварительного контроля знаний в процессе обучения физике являются руководство образовательным процессом, качественное планирование учебного процесса. Следствиями предварительного контроля знаний в процессе обучения физике являются внесение корректив в рабочие программы, определение, какому материалу необходимо уделить внимание, выявление причин и пробелов в знаниях обучающихся.

Характеристики текущего контроля знаний в процессе обучения физике позволяют получить информацию об усвоении материала. Задачами текущего контроля знаний в процессе обучения физике являются работа и корректировка учебного процесса в классе. Следствиями текущего контроля знаний в процессе обучения физике является связь с изложением, закреплением, повторением и применением учебного материала, занимающая малый промежуток времени на уроках физики.

Характеристики тематического контроля знаний в процессе обучения физике позволяют установить внутрипредметные и межпредметные связи, сформировать умение сформулировать выводы в обобщающей форме при помощи физических заданий для контроля усвоения материала по всей теме или разделу курса физики. Задачей тематического контроля знаний в процессе обучения физике является определение качества изучения учебного материала по разделам, темам курса физики. Следствием тематического контроля знаний в процессе обучения физике является внесение корректив по изучению тем и разделов курса физики.

Характеристики итогового контроля знаний в процессе обучения физике позволяют реализовать индивидуальный, дифференцированный и воспитывающий характер проверки и оценки знаний по физике. Задачами итогового контроля знаний в процессе обучения физике являются комплексная оценка и проверка определённых результатов обучения по физике, определение того, как усвоена учащимися система комплексных умений, полученных при изучении физики. Следствием итогового контроля знаний в процессе обучения физике является обобщение и систематизация усвоенного материала по физике. Из предложенного выделим несколько методов контроля, по которым будем определять результативность учебно-познавательной, развивающей деятельности учащихся в классах коррекционно-развивающего обучения на уроках физики.

Результаты педагогического эксперимента

Для организации качественного доступного образования обучающихся с ограниченными возможностями здоровья и с инвалидностью в школе-интернате был реализован федеральный проект «Современная школа» национального проекта «Образование». На основании распоряжения № 9-р от 11.01.2022 Об Утверждении комплекса мер (дорожной карты) реализации мероприятия федерального проекта «Современная школа» национального проекта «Образование» в 2022 году ОГКОУ «Школа-интернат № 91» города Ульяновска стала участником федерального проекта «Доброшкола». Целью реализации мероприятия являлось создание современных условий для обучения и воспитания обучающихся через обновление инфраструктуры школы-интерната, которое повлекло

за собой изменение содержания и повышение качества образовательного процесса. Основными задачами реализации мероприятия являлось обновление оборудования и оснащения, в том числе психолого-педагогического сопровождения и коррекционной работы с обучающимися с ограниченными возможностями здоровья, обучающимися с инвалидностью (оборудование для кабинетов педагога-физики). В рамках реализации данного национального проекта для работы специалистов физики было закуплено различное оборудование, среди которых есть мультимедийная образовательная система EduOest с программным обеспечением EduQuest, состоящим из 10 тематических модулей, включающих более 200 заданий, которые направлены на развитие важных когнитивных компетенций, мышления, моторики; брайлевский органайзер BrailleNote Touch для слепых обучающихся, который сочетает в себе функции смартфона и планшета с физической клавиатурой Брайля; интерактивная touch-панель; различные тифлофлешплееры, оборудование по социально-бытовой ориентировке (ножи-дозаторы, говорящие весы, электронные трости и т.д.). Высокотехнологичное оборудование в школе-интернате является потенциально новым оснащением службы сопровождения, повышающим эффективность коррекционно-развивающей работы.

Приведём характеристику класса. Класс состоит из десяти учащихся, из которых 5 девочек и 5 мальчиков. Один учащийся воспитывается в неполной семье. По итогам первого триместра шесть учащихся успевают на «хорошо» и «отлично». В классе есть два мальчика, которые являются явными лидерами. Познавательный потенциал и познавательная активность у учащихся, желающих изучать предметы средняя. У большинства учащихся устойчивое внимание, хорошая зрительная и слуховая память, но есть учащиеся и с плохой памятью, не владеющими способами запоминания. Шесть учащихся обладают способностью анализировать, обобщать, делать выводы. Коллектив седьмого класса работоспособен, но не все учащиеся обладают навыками самостоятельного умственного труда. В классе есть ученица с высоким уровнем общих и специальных способностей, мыслящая нестандартно. Есть ученик, имеющий особые успехи в области спорта. Класс готов решать творческие задачи: в коллективе есть учащиеся, которые активно принимают участие в жизни класса и школы. Класс очень подвижный, старается быть активным в делах школьной жизни. Ученики довольно открытые, работоспособные, с большим удовольствием и отдачей принимают участие в художественной самодельности школы, в спортивных состязаниях, во всех классных и внеклассных мероприятиях. Отдельные ученики регулярно принимают участие в школьных и районных конкурсах, олимпиадах и занимают призовые места. Дисциплина в классе хорошая. В основном учащиеся не пропускают уроки без уважительной причины, кроме одной ученицы, которую необходимо постоянно контролировать.

В начале урока учитель анализирует выполнение домашнего задания, потом вместе с учениками проводим проверку материала на усвоение пройденной темы. На занятии используется организация контролируемых мероприятий по усвоению теоретического материала по физике, выполненная в виде заполнения обобщающей таблицы в классе коррекционно-развивающего обучения. Ученикам нужно самостоятельно заполнить таблицу с формулами физических величин на оценку в рамках контроля знаний по пройденной теме: «Давление твёрдых тел». Таким способом можно контролировать, усвоен ли учениками материал или усвоен частично. По итогам выставляются отметки за выполнение задания. Подобные таблицы можно расширять или сужать по формату в зависимости от целей контроля. Следующее, что можно применить на уроках физики, это физические диктанты, которые приучают учеников быть активными на уроках, выполнять домашнее задание.

В начале урока по теме «Давление твёрдых тел» был проведён опрос. По результатам опроса только 11% учеников из 10 человек ответили верно на заданные вопросы

по теме «Давление твердых тел». После ученикам нужно самостоятельно заполнить таблицу на данную тему на оценку. Таким способом можно наблюдать, что только 33 % из учеников справились с этой задачей. В конце урока в рамках контроля знаний по пройденной теме «Давление твёрдых тел» провели контрольную работу с помощью неё можно контролировать, усвоен ли учениками материал или усвоен частично. В ходе педагогического эксперимента выявлено, что 56 % учеников справились с работой, а это больше половины. По итогам выставляются отметки за выполнение заданий по физике.

Заключение

Эффективная организация контроля знаний по физике в классах коррекционно-развивающего образования является важным фактором для повышения успеваемости учащихся и их мотивации к обучению. Контроль знаний по физике является неотъемлемой частью процесса обучения физике, и его правильная организация может существенно повлиять на успеваемость учащихся и их мотивацию к обучению. На примере классов коррекционно-развивающего обучения можно увидеть, как индивидуальный подход, систематичность и разнообразие форм контроля помогают ученикам лучше усваивать теоретический материал по физике и развиваться. В результате проведенного исследования проведено внедрение элементов методики обучения физике в практику работы школы-интерната, которая может способствовать улучшению качества обучения физике и развитию учащихся.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если организовать эффективную систему контроля знаний по физике в классах коррекционно-развивающего образования, то это будет способствовать повышению успеваемости учащихся, их мотивации к обучению физике и развитию личностных качеств, подтверждена полностью.

Выбор форм контроля всегда остаётся за учителем, и при этом ему необходимо учитывать индивидуальные особенности учащихся. Особенно это важно при работе с детьми в классах коррекционно-развивающего обучения. Стоит отметить, что контролируемые мероприятия играют воспитательную роль в обучении учащихся, они их дисциплинируют. Важную роль в классах коррекционно-развивающего обучения играет взаимопроверка как форма закрепления и систематизации. Анализируя ответы одноклассников, учащиеся вновь повторяют учебный материал. Для учащихся со слабо усвоенным учебным материалом применять необходимо формы контроля индивидуального характера, например упражнения, учитывающие различную скорость работы учащихся, с активизацией познавательной деятельности. Исследование организации контроля знаний по физике в классах коррекционно-развивающего обучения вносит вклад в развитие педагогической науки и может быть полезно для совершенствования методики обучения физике в целом.

Список использованных источников

1. Lidar M., Danielsson A. T., Berge M. What is construed as relevant knowledge in physics teaching? Similarities and differences in how knowledge and power are staged in three lower secondary classrooms // *Research in Science Education*. — 2018. — may. — Vol. 50, no. 3. — P. 1167–1186. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11165-018-9727-6>.
2. A formal approach to organization of educational objectives / M. Segedinac [et al.] // *Psihologija*. — 2011. — Vol. 44, no. 4. — P. 307–323. — URL: <http://dx.doi.org/10.2298/PSI1104307S>.

3. Esanu A. The significance of prior knowledge in physics learning // eLearning and Software for Education. — eLSE. — Carol I National Defence University Publishing House, 2015. — apr. — P. 1–6. — URL: <http://dx.doi.org/10.12753/2066-026X-15>.

Сведения об авторах:

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

E-mail: frolovaev28@gmail.com

ORCID iD  0009-0009-0817-7242

Web of Science ResearcherID  JKI-1830-2023

Original article
 PACS 01.40.-d
 OCIS 000.2060
 MSC 00A79

Organization of systematic monitoring of knowledge in physics in classes of correctional and developmental education

E. S. Frolova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted November 7, 2023
 Resubmitted November 12, 2023
 Published December 12, 2023

Abstract. The issues of organizing knowledge control on a selected topic of a physics course in classes of correctional and developmental education at a boarding school are considered. The results of a pedagogical experiment on a topic related to the study of the pressure of solid bodies in classes of correctional and developmental education at a boarding school are presented.

Keywords: correctional and developmental education, physics training, physics, knowledge control, knowledge assessment, knowledge testing, knowledge control system, solid body pressure

References

1. Lidar M., Danielsson A. T., Berge M. What is construed as relevant knowledge in physics teaching? Similarities and differences in how knowledge and power are staged in three lower secondary classrooms // *Research in Science Education*. — 2018. — may. — Vol. 50, no. 3. — P. 1167–1186. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11165-018-9727-6>.
2. A formal approach to organization of educational objectives / M. Segedinac [et al.] // *Psihologija*. — 2011. — Vol. 44, no. 4. — P. 307–323. — URL: <http://dx.doi.org/10.2298/PSI1104307S>.
3. Esanu A. The significance of prior knowledge in physics learning // *eLearning and Software for Education*. — eLSE. — Carol I National Defence University Publishing House, 2015. — apr. — P. 1–6. — URL: <http://dx.doi.org/10.12753/2066-026X-15>.

Information about authors:

Evgenia Sergeevna Frolova — 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: frolovaev28@gmail.com

ORCID iD  0009-0009-0817-7242

Web of Science ResearcherID  JKI-1830-2023

Авторский указатель

Алтунин, К. К., 1, 29, 53

Железникова, Е. С., 1

Захарова, О. Н., 44

Лебедев, А. А., 91

Соколова, В. В., 1

Тимченко, В. М., 80

Федотова, А. С., 44

Фролова, Е. С., 112

Шарнина, И. А., 53

Index of authors

Altunin, K. K., 1, 29, 53

Fedotova, A. S., 44

Frolova, E. S., 112

Lebedev, A. A., 91

Sharnina, I. A., 53

Sokolova, V. V., 1

Timchenko, V. M., 80

Zakharova, O. N., 44

Zheleznikova, E. S., 1

