

ISSN 2712-8326



НАУКА ONLINE
SCIENCE ONLINE

Сетевое издание
№ 2 (27) | 2024

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

НАУКА ONLINE, № 2 (27), 2024.

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 2 (27), 2024.

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, доцент кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», город Ульяновск, Российская Федерация.

Вилков Евгений Александрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории исследований физических явлений на поверхности и границах раздела твердых тел, Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, фрязинский филиал, город Фрязино, Московская область, Российская Федерация.

Громова Екатерина Михайловна, кандидат педагогических наук, доцент, декан факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», город Ульяновск, Российская Федерация.

Демин Максим Викторович, кандидат физико-математических наук, проректор по научной работе ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», город Калининград, Российская Федерация.

Идиатуллов Тимур Тофикович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры СМАРТ-технологии ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», город Москва, Российская Федерация.

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

Капитанчук Василий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры организации аэропортовой деятельности и информационных технологий ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева», город Ульяновск, Российская Федерация.

Каренин Алексей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информатики ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», город Ульяновск, Российская Федерация.

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

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

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

Фомин Игорь Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор факультета фундаментальных наук ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», город Москва, Российская Федерация.

Фролов Даниил Анатольевич, кандидат биологических наук, декан естественно-географического факультета ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», город Ульяновск, Российская Федерация.

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

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

Шалин Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», город Санкт-Петербург, Российская Федерация.

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

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», город Ульяновск, Российская Федерация.

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, Ulyanovsk, Russian Federation.

Evgeniy Aleksandrovich Vilkov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, leading researcher at the Laboratory for Research of Physical Phenomena on the Surface and Interfaces of Solids, Institute of Radio Engineering and Electronics named after V. A. Kotelnikov RAS, Fryazino branch, Fryazino city, Moscow region, Russian Federation.

Ekaterina Mikhailovna Gromova, PhD, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russian Federation.

Maxim Viktorovich Demin, PhD, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Vice-Rector for Scientific Work of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Immanuel Kant Baltic Federal University”, Kaliningrad, Russian Federation.

Timur Tofikovich Idiatullov, PhD, Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the department of SMART technologies of the Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation.

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”, Republic of Bashkortostan, Russian Federation.

Vasily Vyacheslavovich Kapitanchuk, PhD, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Organization of Airport Operations and Information Technologies of the Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation B. P. Bugaev, Ulyanovsk, Russian Federation.

Aleksey Aleksandrovich Karenin, PhD, Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Informatics, Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russian Federation.

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.

Svetlana Aleksandrovna Pyrova, PhD, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Biology and Chemistry of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russian Federation.

Vladimir Nikolaevich Fedorov, PhD, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Geography and Ecology of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russian Federation.

Igor Vladimirovich Fomin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Faculty of Basic Sciences of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (National Research University)”, Moscow, Russian Federation.

Daniil Anatolyevich Frolov, PhD, Candidate of Biological Sciences, Dean of the Faculty of Natural Geography of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russian Federation.

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

Sergey Viktorovich Chervon, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russian Federation.

Alexander Sergeevich Shalin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research University ITMO”, St. Petersburg, Russian Federation.

Viktor Vyacheslavovich Shishkarev, PhD, Candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of the department of physics and technical disciplines of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russian Federation.

Valery Gennadievich Shubovich, Doctor of Pedagogical Sciences, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Informatics, Professor of the Department of Informatics of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russian Federation.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Физические науки	1
Оптика	1
1 Исследование оптических свойств наноструктур с одномерными фотонными кристаллами типа АВ <i>К. К. Алтунин, Р. Р. Алиева</i>	
21 Исследование оптических свойств наноструктур с одномерными фотонными кристаллами типа АВС <i>К. К. Алтунин, Р. Р. Алиева</i>	
Науки об образовании	41
Теория и методика обучения и воспитания	41
41 Исследование методики преподавания курса нанооптики в педагогическом университете <i>К. К. Алтунин, Е. С. Сорокина</i>	
56 Разработка дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике <i>Е. С. Железникова, В. В. Соколова</i>	
72 Разработка электронного образовательного ресурса по теории магнитных явлений <i>О. Н. Захарова</i>	
88 Методические аспекты описания термодинамических свойств технических систем с помощью энтропии газа в каноническом ансамбле <i>И. А. Малова</i>	
Авторский указатель	99

CONTENTS

Physical sciences	1
Optics	1
1 Investigation of the optical properties of nanostructures with one-dimensional photonic crystals of the AB type <i>K. K. Altunin, R. R. Alieva</i>	
21 Investigation of the optical properties of nanostructures with one-dimensional photonic crystals of the ABC type <i>K. K. Altunin, R. R. Alieva</i>	
Educational sciences	41
Theory and methodology of training and education	41
41 Investigation on teaching methods for a nanooptics course at a pedagogical university <i>K. K. Altunin, E. S. Sorokina</i>	
56 Development of a distance course on artificial intelligence methods in physics <i>E. S. Zheleznikova, V. V. Sokolova</i>	
72 Development of an electronic educational resource on the theory of magnetic phenomena <i>O. N. Zakharova</i>	
88 Methodological aspects of describing the thermodynamic properties of technical systems using gas entropy in the canonical ensemble <i>I. A. Malova</i>	
Author's index	100

Секция 1

Физические науки

1.1 Оптика

Научная статья

УДК 535.3

ББК 22.343

ГРНТИ 29.31.21

ВАК 1.3.6.

RACS 42.25.Bs

OCIS 310.6628

MSC 00A79

Исследование оптических свойств наноструктур с одномерными фотонными кристаллами типа АВ

К. К. Алтунин , Р. Р. Алиева  ¹

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

Поступила в редакцию 11 апреля 2024 года

После переработки 12 апреля 2024 года

Опубликована 12 июня 2024 года

Аннотация. Рассмотрены оптические свойства наноструктур с одномерными фотонными кристаллами типа АВ. Предложена теоретическая модель оптических процессов в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа АВ. Получено решение дисперсионного уравнения для электромагнитных волн в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа АВ. Проведённые компьютерные расчёты для наноразмерных структур с одномерными фотонными кристаллами типа АВ позволили построить графики дисперсионных зависимостей света в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа АВ, в которых наблюдалось появление фотонных запрещённых зон, свидетельствующих о специфических оптических свойствах наноструктур с фотонными кристаллами типа АВ.

Ключевые слова: оптическое излучение, фотонный кристалл, наноструктура, электромагнитная волна, дисперсионное уравнение, фотонная запрещённая зона

¹E-mail: alieva02regina@mail.ru

Введение

С развитием нанотехнологий и квантовой оптики наноструктур возникает всё больший интерес к исследованию оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами является актуальным направлением в области квантовой оптики и нанотехнологий. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами позволяет улучшить физические характеристики существующих оптоэлектронных устройств и приборов.

Цель исследования состоит в том, чтобы изучить и проанализировать оптические свойства наноструктурных материалов с фотонными кристаллами типа АВ.

Задачи исследования:

1. написать обзор литературы по физическим свойствам и принципам функционирования наноструктур с фотонными кристаллами,
2. разработать модель, учитывающую влияние различных факторов (например, размера и формы наноструктур, материала, из которого они изготовлены) на оптические свойства наноструктур с фотонными кристаллами типа АВ.

Объектом исследования является группа наноструктур с одномерными фотонными кристаллами типа АВ. Предметом исследования является совокупность оптических свойств наноструктур с одномерными фотонными кристаллами типа АВ.

Научная новизна исследования заключается в выявлении особенностей оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами, что может послужить основой для разработки новых технологий в области нанооптики и наноэлектроники. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами в контексте квантовой оптики наноструктур является новым и перспективным направлением исследований, которое позволяет получить новые знания о функционировании наноструктур с фотонными кристаллами. Разработка новых методов и технологий, основанных на оптических свойствах наноструктур с фотонными кристаллами, может привести к созданию новых материалов и устройств с улучшенными физическими характеристиками. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами в контексте квантовой оптики наноструктур может помочь в решении актуальных проблем в области оптики, фотоники и квантовой электроники.

Исследование проводилось с использованием следующих методов исследования:

1. использование математических моделей и теоретических подходов для анализа оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами,
2. использование компьютерных программ, программных комплексов и алгоритмов для численного моделирования оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами,
3. для анализа оптических свойств наноструктур применялись теоретические методы, позволяющие описывать взаимодействие света с наноструктурами на различных длинах волн излучения.

В качестве материалов исследования использовались материалы наноразмерных структур с фотонными кристаллами различных геометрических размеров и форм, наноматериалы, изготовленные на основе фотонных кристаллов.

Гипотеза исследования заключается в том, что если выявить особенности оптических свойств фотонных кристаллов типа АВ, то курс квантовой оптики наноструктур можно наполнить теоретическими сведениями по фотонным кристаллам типа АВ.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами в контексте курса квантовой

оптики наноструктур имеет важное теоретическое значение и расширяет понимание оптических явлений в фотонных кристаллах, поскольку оно помогает лучше понимать основные физические принципы функционирования наноструктур на основе фотонных кристаллов и взаимодействие с оптическим излучением.

Практическая значимость исследования состоит в том, что исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами в контексте квантовой оптики наноструктур имеет важное практическое значение, поскольку оно может помочь в разработке новых методов и технологий, основанных на оптических свойствах наноструктур с фотонными кристаллами, а также в создании новых оптоэлектронных приборов и устройств с улучшенными физическими характеристиками. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами может быть использовано в различных областях физики и техники, включая нанооптику, нанофотонику, квантовую электронику.

Обзор научных работ по оптическим свойствам наноструктур с фотонными кристаллами

Электродинамические процессы в различных фотонных кристаллах включают изучение уникальных физических характеристик металлофотонных и магнитофотонных структур, изучение плазмонных резонансов, прохождения оптического излучения, взаимодействия с электронными потоками и волновых процессов в различных материалах [1]. Кроме того, исследуются электродинамические свойства фотонно-кристаллических схем, легированных активными узлами решётки, с упором на механизмы распространения световых волн в плоскости с использованием строгих полуаналитических методов [2]. Изучена нелинейная динамика, индуцированная в подвешенных наномембранах фотонным кристаллом, действующим как деформируемое зеркало, наблюдая бистабильность и субгармонические резонансы высокого порядка за счёт электростатических сил, прикладываемых интегрированными электродами [3]. Эти исследования способствуют пониманию поведения света в фотонных структурах и их потенциального применения в субтерагерцовой и терагерцовой электронике [4].

В статье [2] исследован механизм распространения световых волн в плоскости в фотонно-кристаллических схемах, легированных активными узлами решётки, с использованием строгого полуаналитического метода. В статье [2] исследуются электродинамические свойства и особенно механизм распространения световых волн в плоскости в фотонно-кристаллических схемах, легированных активными узлами решётки, с упором на механизмы распространения световых волн в плоскости с использованием полуаналитического метода.

В работе [3] изучается нелинейная динамика, возникающая в подвешенных наномембранах, пронизанных фотонным кристаллом, действующим как деформируемое зеркало, работающее при нормальном падении оптического излучения. На мембрану воздействуют путём приложения электростатической силы, создаваемой встречно-штыревыми электродами, встроенными под мембрану. В работе [3] наблюдаются бистабильность и субгармонические резонансы высоких порядков.

В статье [4] исследовано влияние электрического поля на показатель преломления материалов в твёрдом состоянии, а результаты использованы при изготовлении большого количества оптических устройств, таких как перестраиваемые узкополосные интерференционные поляризационные монохроматоры, модуляторы света, deflectory луча, преобразователи частоты и генераторы второй гармоники.

В статье [5] обсуждаются основные концепции и принципы фотонных кристаллов, а также их способности управлять светом и обеспечивать необычные оптические явления, такие как отрицательное преломление света, эффект суперпризмы и возможность

субволновой фокусировки. Фотонные кристаллы демонстрируют электродинамические процессы, такие как отрицательное преломление, эффект суперпризмы и суперлинзирование, благодаря своей периодической структуре, управляя светом уникальными способами на основе уравнений Максвелла. В статье [5] обсуждаются конкретные примеры, включая отрицательное преломление света, эффект суперпризмы (аномальная электромагнитная дисперсия) и возможность субволновой фокусировки. Это очень общие результаты, основанные на прямых решениях уравнений Максвелла.

В статье [6] исследуется фазовая и амплитудная динамика электромагнитного поля в двумерном фотонном кристалле при инъекции фемтосекундных импульсов, показывая, что обычное адиабатическое приближение, лежащее в основе динамики поля и носителей в полупроводниковом резонаторе, больше не справедливо. поскольку, вообще говоря, временем жизни фотона нельзя пренебрегать по отношению к времени жизни рекомбинации носителей. В статье [6] изучена неадиабатическая динамика электромагнитного поля и носителей заряда в фотонно-кристаллических резонаторах, обнаружена нарушение адиабатического приближения из-за взаимодействия времен жизни фотонов и носителей заряда. В статье [6] рассматривается как экспериментально, так и теоретически динамика фазы и амплитуды электромагнитного поля в двумерном фотонном кристалле при инъекции фемтосекундных импульсов. В статье [6] показано, что обычное адиабатическое приближение, лежащее в основе динамики поля и носителей в полупроводниковом резонаторе, больше не применимо, поскольку, вообще говоря, нельзя пренебрегать временем жизни фотона по отношению к времени жизни рекомбинации носителей. В статье [6] показаны области параметров, в которых адиабатичность нарушается, и предсказано повсеместное распространение наблюдаемого динамического сценария в новом поколении активных фотонных микрорезонаторов.

В статье [7] рассмотрено возбуждение диполем металлических фотонных кристаллов и получены аналитические выражения, позволяющие дать простую оценку частот, определяющих края запрещённой зоны в спектре собственных состояний такого кристалла, а также, для описания амплитудных характеристик излучения в низкочастотном диапазоне. В статье [7] анализируются электродинамические свойства металлических фотонных кристаллов, выводятся аналитические выражения для краёв запрещённой зоны и характеристик излучения, сравниваются с результатами, полученными численным моделированием.

В фотонно-кристаллических системах полоса пропускания импульса может быть полностью сжата до нуля, что приводит к полностью оптической остановке и хранению световых импульсов на кристалле, как обсуждает в статье [8]. Когда в фотонно-кристаллические системы вводится динамическое поведение, открываются новые удивительные возможности. Например, полосу пропускания импульса можно полностью сжать до нуля, что приведёт к полностью оптической остановке и хранению световых импульсов на кристалле. Спектр импульса также можно инвертировать вокруг центральной частоты, чтобы повернуть время оптического импульса вспять.

В статье [9] фотонно-кристаллический пластинчатый волноводный резонатор с наноструктурным нелинейным оптическим полимером второго порядка использовался для электрооптической модуляции с чувствительностью менее 1 В. Электрооптически перестраиваемые фотонные кристаллы демонстрируют линейную электрооптическую модуляцию, основанную на эффекте Погкельса, что обеспечивает чувствительность менее 1 В и сверхбыстрый отклик для нанофотонных устройств. В статье [9] сообщается об электрооптической модуляции с чувствительностью менее 1 В в фотонно-кристаллическом пластинчатом волноводном резонаторе, который содержит наноструктурированный нелинейный оптический полимер второго порядка. Электрооптическая восприимчивость в активной зоне была вызвана поляризацией сильного электрического

го поля. Квадратная решётка отверстий, несущих линейный дефект, была перенесена в пластину с помощью электронно-лучевой литографии и реактивного ионного травления, в результате чего был создан резонатор на основе фотонно-кристаллической пластины. Приложение внешнего напряжения электрической модуляции к электродам приводит к линейному электрооптическому сдвигу резонансного спектра и, следовательно, к модуляции пропускания на фиксированной длине волны на основе поляризации электронного смещения в нецентросимметричной среде (эффект Поггеля). Таким образом, этот эффект по своей природе быстрее, чем другие известные эффекты электрооптической модуляции в нанопотонике.

В работе [10] описано распространение света через электрооптический кристалл описывается на основе феноменологической теории и обсуждаются различные экспериментальные методы измерения этих физических эффектов, включая объёмные модуляторы, дефлекторы, а также модуляторы сосредоточенных и бегущих волн, изготовленные из волноводов. Распространение света через электрооптический кристалл описывается на основе феноменологической теории. Приведены некоторые физические аспекты, определяющие величину электрооптических эффектов, и обсуждаются различные экспериментальные методы измерения этих эффектов. В работе [10] в качестве показательных примеров важных электрооптических материалов LiNbO_3 , тетрагональные бронзы, перовскиты, KDP и полупроводники со структурой сфалерита характеризуются с точки зрения роста кристаллов, методов получения и диэлектрических свойств. Критически рассмотрены величины их электрооптических коэффициентов. Обсуждаются основные идеи различных типов модуляторов и последние достижения в производстве устройств. К ним относятся объёмные модуляторы, дефлекторы, а также модуляторы сосредоточенных и бегущих волн, изготовленные из волноводов. Наконец, в работе [10] объяснены электрооптическая бистабильность и фоторефрактивный эффект, который лежит в основе голографической памяти. Статья [10] может служить введением в электрооптические эффекты и документацией по специальным применениям кристаллов.

Фотонные кристаллы привлекли внимание благодаря их потенциалу в передовых оптических приложениях, чему способствовали достижения в области полупроводниковых технологий, позволяющие создавать структуры, сравнимые с длинами волн света. Фотонно-кристаллические устройства могут включать в себя различные компоненты, такие как диэлектрические подложки с изменяющейся диэлектрической проницаемостью, подвижные части, изменяющие структуру фотонных зон, оптические волноводы, резонаторы и слои графена. Используя периодичность наноразмерных структур с фотонными кристаллами, фотонные кристаллы обладают уникальными свойствами для управления и направления света, открывая возможности для инновационных оптических устройств и систем. Квантовые эмиттеры в твердотельных кристаллах привлекли значительное внимание благодаря быстрому развитию приложений квантовых технологий, таких как квантовые вычисления, квантовая связь и квантовое зондирование [11–14].

Двойные полудираковские конусы, возникающие из пары сосуществующих трижды вырожденных мод, могут быть проанализированы с помощью теории эффективного гамильтониана и эффективной среды, что сопровождается топологическими переходами на равночастотных поверхностях и значительными изменениями в электромагнитных откликах. В статье [15] обнаружено, что фотонный кристалл демонстрирует сильно анизотропные свойства переноса волн, то есть совершенно разные свойства переноса волн с разными направлениями волновых векторов в частотном диапазоне между двумя полудираковскими частотами. Однако на частотах полудираковских точек фотонный кристалл ведёт себя как эффективная двухнулевая среда для двух направлений распространения и как однонулевая среда для остальных направлений, особенно для

ортогональных поляризации. В статье [15] получены результаты, которые дают ценную информацию о трёхмерных искусственных материалах, демонстрируя особенности, отсутствующие в двумерных системах.

Искусственные периодические структуры, включая фотонные кристаллы и метаструктурные материалы, широко используются для управления распространением оптического излучения, тогда как их эффективный относительный импеданс и показатель преломления обычно связаны вместе, и их трудно проектировать отдельно. В статье [16] продемонстрировано, что с помощью вращательных деформаций внутри элементарных ячеек относительный импеданс Z_r двумерного фотонного кристалла можно гибко регулировать, при этом показатель преломления практически не изменяется. Это соответствует переходу эффективной относительной проницаемости, связанной с топологическим свойством нижней зоны. Таким образом, нулевое отражение при $Z_r = 1$ достигается в широком диапазоне частот вблизи краёв зоны, что важно для создания высокопроизводительных фотонных устройств.

В статье [17] исследуется, как изменение геометрии интерфейса с зигзага на интерфейс плоскости скольжения между двумя топологически различными объектами, имитирующими фотонные кристаллы, глубоко влияет на краевые состояния. В статье [17] экспериментально наблюдается переход от бесщелевых краевых состояний к щелевым, сопровождающийся появлением медленного света внутри зоны Бриллюэна, а не на её краю. В статье [17] численно моделируется распространение и измеряем коэффициент пропускания модифицированных краевых состояний через специально разработанный дефект, сохраняющий долину. Устойчивость к обратному рассеянию постепенно снижается, что указывает на нарушение переноса, зависящего от долины. В статье [17] продемонстрировано значение геометрии интерфейса для бесщелевых краевых состояний в долине Холла, имитирующей фотонные кристаллы.

Нанопотонные структуры, особенно содержащие фотонные кристаллы, открывают уникальные возможности в оптомеханике полостей, фотонике и сенсорных приложениях. Используя фотонно-кристаллические мембраны, можно создать новые оптомеханические платформы, позволяющие захватывать свет на неопределённый срок и облегчающие различные оптомеханические связи [18]. Кроме того, использование фотонных кристаллов в нанопучках на подложках из пористого кремния повышает чувствительность обнаружения олигонуклеотидов без меток, сочетая в себе высококачественный фактор с большей активной чувствительной областью [19]. Сверхрешётки плазмонных наночастиц с контролируемым расстоянием и высокими показателями преломления представляют собой альтернативу традиционным фотонным кристаллам, предлагая широкие фотонные полосы задерживания и высокие свойства отражения [20]. Эти достижения демонстрируют потенциал наноструктур с фотонными кристаллами в революционном преобразовании оптомеханических систем, сенсорных технологий и конструкции фотонных устройств [21].

В статье [18] нанопотонная структура используется для получения доступа к ранее недоступным режимам в оптомеханике резонаторов, таким как линейная или квадратичная связь дисперсионного или диссипативного типа, путём настройки фотонного рисунка и длины резонатора. Поскольку микроэлектронная технология приближается к пределу того, чего можно достичь с точки зрения скорости и уровня интеграции, растёт интерес к переходу от электроники к фотонике, где фотоны и световые лучи заменяют электроны и электрические токи, что приведёт к более высоким скоростям обработки и более низкому энергопотреблению, как указано в статье [19]. Наноструктуры, такие как фотонные кристаллы, обладают уникальными оптическими свойствами, что позволяет добиться прогресса в фотонике и оптоэлектронике за счёт использования таких квантовых физических явлений.

В статье [20] показано, что фотонно-кристаллические нанолучи на твердотельных подложках из пористого кремния обеспечивают обнаружение олигонуклеотидов без меток с высокой чувствительностью, большой активной площадью и совместимостью с КМОП-обработкой и лабораторными системами. Эти фотонные структуры сочетают в себе большую активную область чувствительности, присущую датчикам на фотонных кристаллах, с высоким коэффициентом добротности и низкомодовым объёмом, характерным для компактных резонансных фотонных кристаллов в устройствах на основе структуры кремния на изоляторе.

В статье [21] излагается набор принципов проектирования для изготовления фотонных кристаллов с желаемыми свойствами фотонной полосы задерживания с использованием преимуществ группы прокладок, параметра проектирования, ставшего возможным благодаря недавним достижениям в процессах сборки снизу вверх. Сверхрешётки плазмонных наночастиц предлагают новый подход к созданию фотонных кристаллов с контролируемым расстоянием и высоким показателем преломления, что обеспечивает широкие фотонные полосы задерживания и высокий коэффициент отражения. Фотонные кристаллы широко изучаются благодаря их широкому технологическому применению в лазерах, датчиках, оптических телекоммуникациях и устройствах отображения. Обычно фотонные кристаллы представляют собой периодические структуры соприкасающихся диэлектрических материалов с чередующимися высокими и низкими показателями преломления, и на сегодняшний день интересующие переменные сосредоточены в первую очередь на симметрии кристаллов и показателях преломления составляющих их материалов, в первую очередь полимеров и полупроводников. Напротив, моделирование во временной области с конечной разностью предполагает, что сверхрешётки плазмонных наночастиц с спейсерными группами предлагают альтернативный путь к фотонным кристаллам из-за контролируемого расстояния между наночастицами и высокого показателя преломления решёток, даже вдали от плазмонной частоты, где потери невелики. В статье [21] охарактеризованы и сравнены особенности полос задерживания 13 решёток Браве, что приводит к изменению парадигмы принципов проектирования фотонных кристаллов. На основе этих правил проектирования прогнозируется, что простая кубическая структура с параметром решётки порядка 130 нм будет иметь широкую фотонную полосу задерживания, свойство, подтвержденное синтезом структуры с помощью программируемой сборки ДНК и её характеристикой с помощью измерений отражательной способности. В статье [21] с помощью моделирования показываем, что максимальный коэффициент отражения более 0.99 может быть достигнут в этих плазмонных фотонных кристаллах за счёт оптимизации состава наночастиц и структурных параметров.

Анализ научной литературы по фотонным кристаллам показывает актуальность темы исследования.

Теоретическая модель оптических процессов в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа АВ

Фотонный кристалл представляет собой структуру, обладающую периодически изменяющейся комплексной диэлектрической проницаемостью (или комплексным показателем преломления) либо неоднородностью структуры, период которой сравним с длиной волны оптического излучения. В качестве модели для исследования оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами можно использовать многослойные наноструктуры, состоящие из чередующихся слоёв с различными показателями преломления. Такие структуры обладают фотонными запрещёнными зонами, которые можно настраивать, изменяя параметры структуры (толщину слоёв, показатель преломления). Фотонные кристаллы с фотонными запрещёнными зонами, внутри которых свет не мо-

жет распространяться, могут быть использованы для создания фильтров, волноводов, брэгговских зеркал и других оптоэлектронных устройств. Кроме того, можно использовать квантовомеханические модели, такие как метод эффективной массы, для описания движения электронов в наноструктурах.

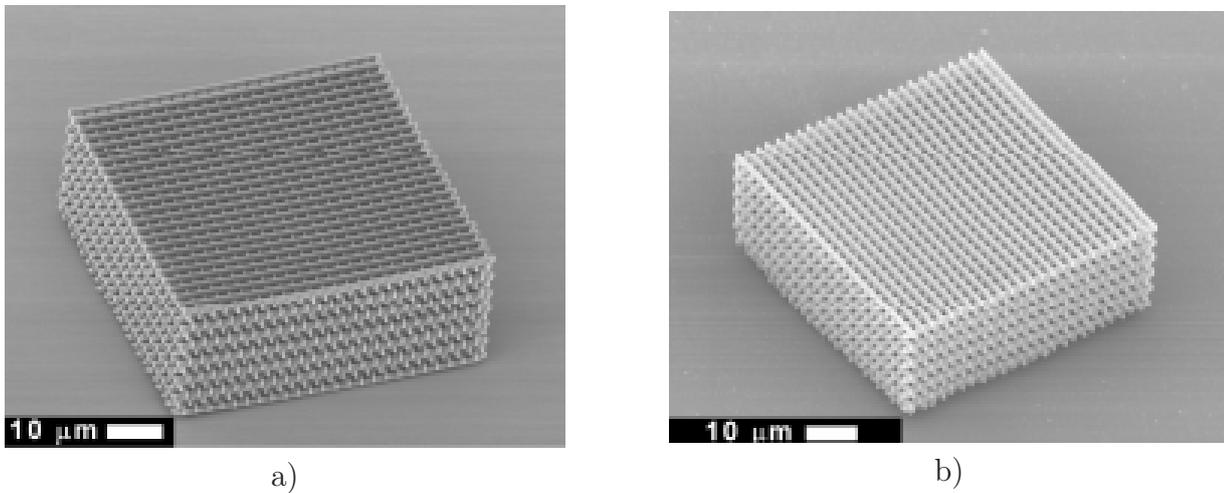


Рис. 1. Изображения полимерных фотонных кристаллов «стопка брёвен» с сканирующего электронного микроскопа до (а) и после (б) покрытия медью. Фотонные кристаллы были спроектированы так, чтобы иметь симметрию и параметры элементарной ячейки $b = a\sqrt{2} = 3.54 \mu\text{м}$ и $c = 3.60 \mu\text{м}$, где a и $c/4$ – межцентровое горизонтальное и вертикальное логарифмическое расстояние соответственно

На рис. 1 приведены изображения полимерных фотонных кристаллов «стопка брёвен» с сканирующего электронного микроскопа до (а) и после (б) покрытия медью. Фотонные кристаллы были спроектированы так, чтобы иметь симметрию и параметры элементарной ячейки $b = a\sqrt{2} = 3.54 \mu\text{м}$ и $c = 3.60 \mu\text{м}$, где a и $c/4$ – межцентровое горизонтальное и вертикальное логарифмическое расстояние соответственно.

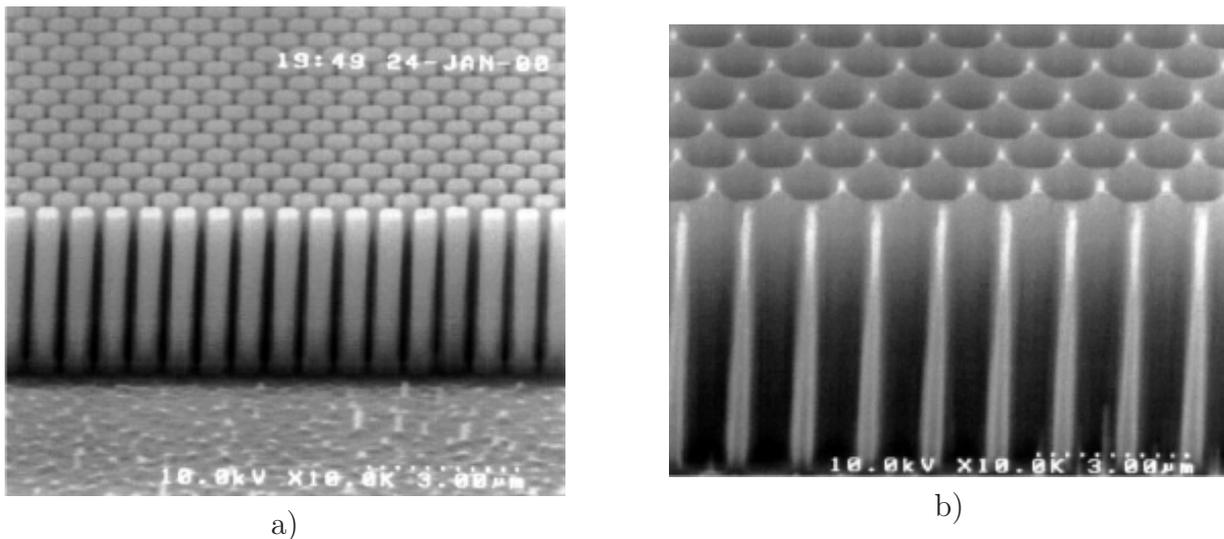


Рис. 2. Изображения диэлектрического стержня (а) и воздушного столба (б) фотонных структур с треугольной решёткой с сканирующего электронного микроскопа, полученных методом реактивного ионного травления Si. В (а) постоянная решётки равна 700 нм, диаметр стержня равен 500 нм, высота стержня равна 3.9 мкм. В (б) постоянная решётки 580 нм, радиус столбца 430 нм, высота столбца равна 4.2 мкм

На рис. 2 приведено изображение диэлектрического стержня (а) и воздушного столба (б) фотонных структур с треугольной решёткой с сканирующего электронного микроскопа, полученных методом реактивного ионного травления Si. В (а) постоянная решётки равна 700 нм, диаметр стержня равен 500 нм, высота стержня равна 3.9 мкм. В (б) постоянная решётки 580 нм, радиус столбца 430 нм, высота столбца равна 4.2 мкм.

Рассмотрим оптические процессы в фотонных кристаллах из периодически повторяющихся слоёв А и В.

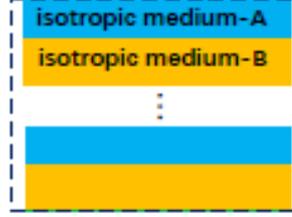


Рис. 3. Структура фотонного кристалла типа АВ

На рис. 3 приведено изображение структуры фотонного кристалла типа АВ.

Слой А имеет толщину d_A и показатель преломления n_A . Слой В имеет толщину d_B и показатель преломления n_B . Эффективная диэлектрическая проницаемость системы из двух слоёв А и В описывается тензором:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_t & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_t & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_{At}d_A N + \varepsilon_{Bt}d_B N}{d}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_n = \frac{d_A N / \varepsilon_{At} + d_B N / \varepsilon_{Bt}}{d}, \quad (3)$$

где N – число повторяющихся слоёв в структуре фотонного кристалла.

Для определения продольных компонент тензора диэлектрической проницаемости ячейки фотонного кристалла применим следующие формулы смешения:

$$\varepsilon_{At} = f_A \varepsilon_{Ai} + (1 - f_A) \varepsilon_{Am}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{Bt} = f_B \varepsilon_{Bi} + (1 - f_B) \varepsilon_{Bm}. \quad (5)$$

Для определения поперечных компонент тензора диэлектрической проницаемости ячейки фотонного кристалла применим следующие формулы смешения:

$$\varepsilon_{An} = \frac{1}{\frac{f_A}{\varepsilon_{Ai}} + \frac{(1-f_A)}{\varepsilon_{Am}}}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{Bn} = \frac{1}{\frac{f_B}{\varepsilon_{Bi}} + \frac{(1-f_B)}{\varepsilon_{Bm}}}. \quad (7)$$

Для системы включений воспользуемся формулой

$$\varepsilon_i = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (8)$$

в которой $\varepsilon_\infty = 5$, $\omega_p = 2\pi \cdot 2175$ ТГц, $\gamma = 2\pi \cdot 4.35$ ТГц.

Волновое число электромагнитной волны в слое А найдём по формуле:

$$k_A = n_A k_0 = n_A \frac{\omega}{c} = \sqrt{\varepsilon_A} \frac{\omega}{c} = n_A \frac{2\pi}{\lambda} . \quad (9)$$

Волновое число электромагнитной волны в слое В найдём по формуле:

$$k_B = n_B k_0 = n_B \frac{\omega}{c} = \sqrt{\varepsilon_B} \frac{\omega}{c} = n_B \frac{2\pi}{\lambda} . \quad (10)$$

Дисперсионное соотношение электромагнитных волн в одномерном фотонном кристалле с бесконечным числом слоёв имеет вид:

$$\cos Kd = \cos k_A d_A \cos k_B d_B - \frac{1}{2} \left(\frac{k_B}{k_A} + \frac{k_A}{k_B} \right) \sin k_A d_A \sin k_B d_B . \quad (11)$$

Учитывая соотношения (9) и (10), получаем

$$\cos Kd = \cos k_A d_A \cos k_B d_B - \frac{1}{2} \left(\frac{n_B}{n_A} + \frac{n_A}{n_B} \right) \sin k_A d_A \sin k_B d_B . \quad (12)$$

Выражаем

$$Kd = \arccos \left(\cos k_A d_A \cos k_B d_B - \frac{1}{2} \left(\frac{n_B}{n_A} + \frac{n_A}{n_B} \right) \sin k_A d_A \sin k_B d_B \right) , \quad (13)$$

получим

$$K = \frac{1}{d} \arccos \left(\cos k_A d_A \cos k_B d_B - \frac{1}{2} \left(\frac{n_B}{n_A} + \frac{n_A}{n_B} \right) \sin k_A d_A \sin k_B d_B \right) . \quad (14)$$

Дополнительные ветви дисперсионной кривой находятся из соотношений:

$$K_+ = \frac{G_A}{2} \frac{k_A \Lambda}{\sqrt{\varepsilon_A + \frac{\Delta\varepsilon_A}{2}}} , \quad (15)$$

$$K_- = \frac{G_B}{2} \frac{k_B \Lambda}{\sqrt{\varepsilon_B - \frac{\Delta\varepsilon_B}{2}}} , \quad (16)$$

где

$$G_A = \frac{2\pi}{d_A} , \quad (17)$$

$$G_B = \frac{2\pi}{d_B} . \quad (18)$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_n - \varepsilon_t . \quad (19)$$

$$d = N (d_A + d_B) . \quad (20)$$

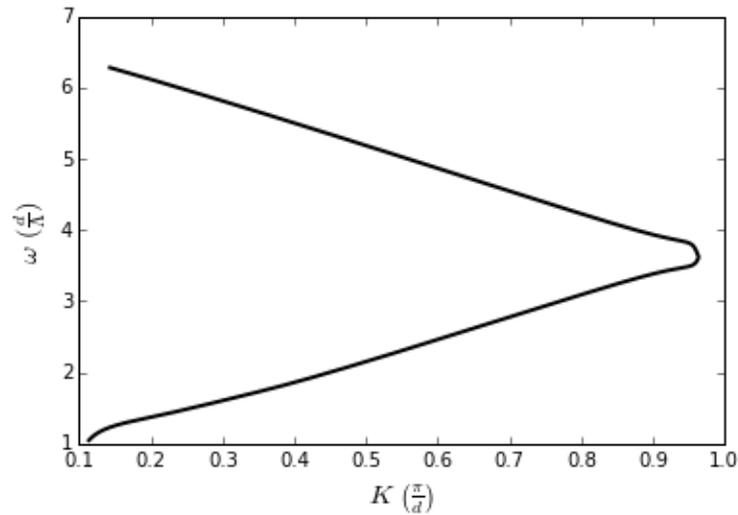


Рис. 4. Дисперсионная зависимость $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.01$

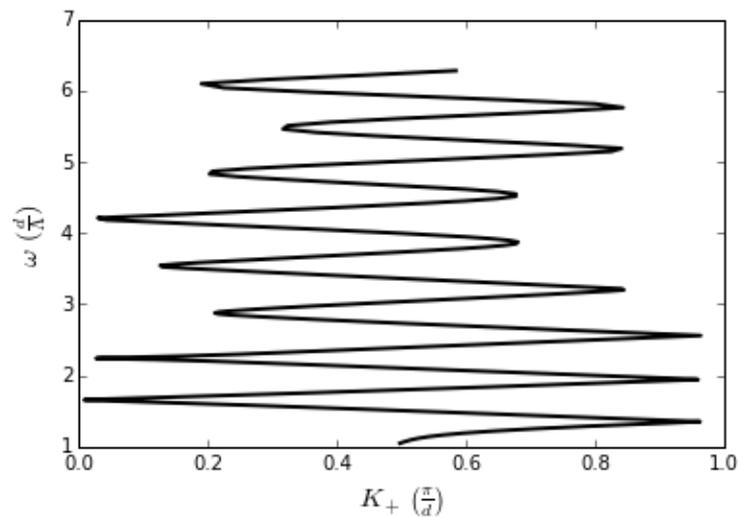


Рис. 5. Дисперсионная зависимость $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.01$

Результаты численного решения дисперсионного уравнения для электромагнитных волн в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа АВ

Приведём результаты численных расчётов дисперсионной зависимости электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ.

На рис. 4 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.01$.

На рис. 5 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.01$.

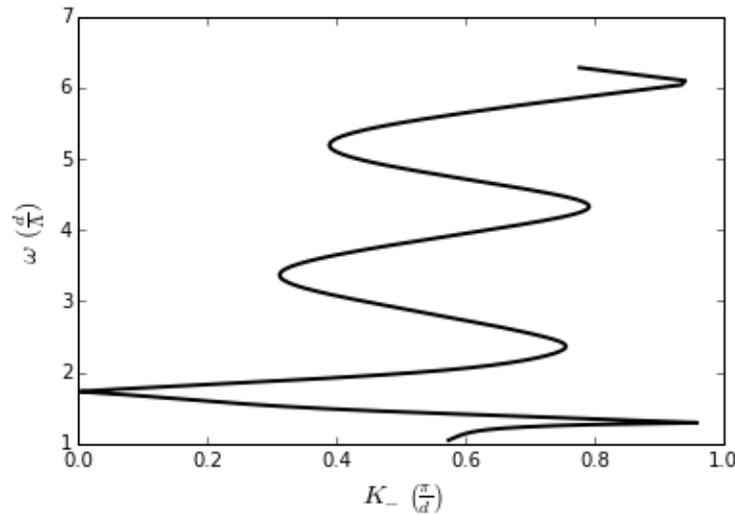


Рис. 6. Дисперсионная зависимость $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.01$

На рис. 6 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.01$.

Изменим фактор заполнения среды А.

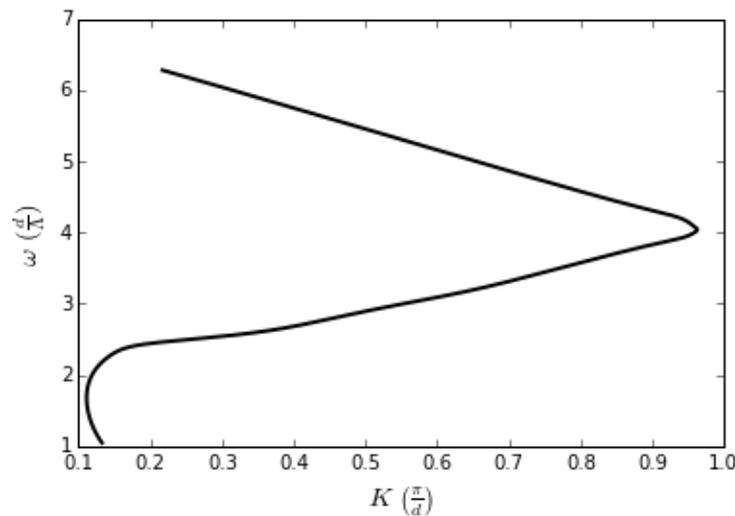


Рис. 7. Дисперсионная зависимость $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.01$

На рис. 7 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.01$.

На рис. 8 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.01$.

На рис. 9 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм,

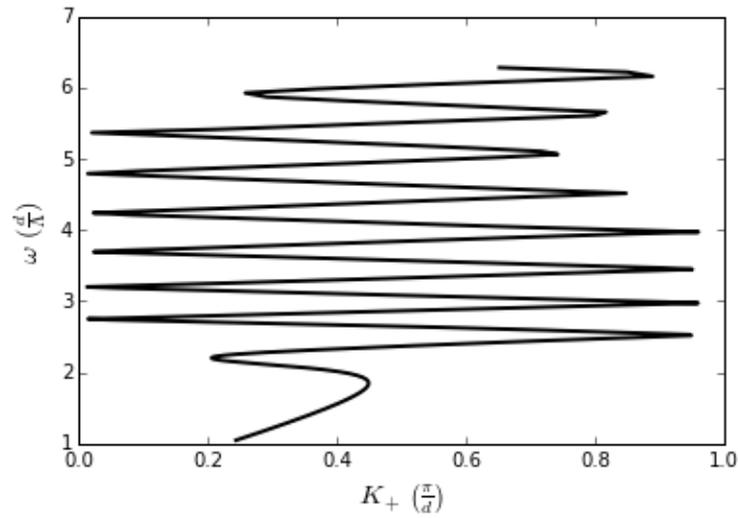


Рис. 8. Дисперсионная зависимость $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.01$

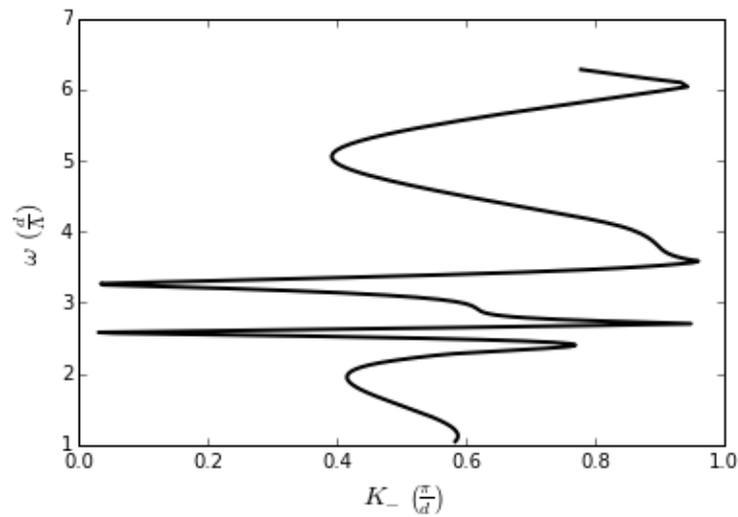


Рис. 9. Дисперсионная зависимость $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.01$

$d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.01$.

Изменим число слоёв. Возьмём число слоёв, равным $N = 100$, для фотонного кристалла типа АВ.

На рис. 10 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.01$.

На рис. 11 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.01$.

На рис. 12 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.01$.

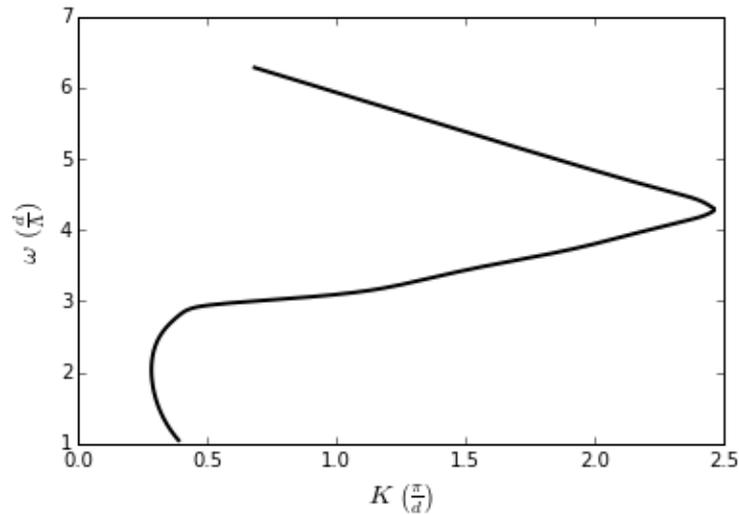


Рис. 10. Дисперсионная зависимость $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.01$

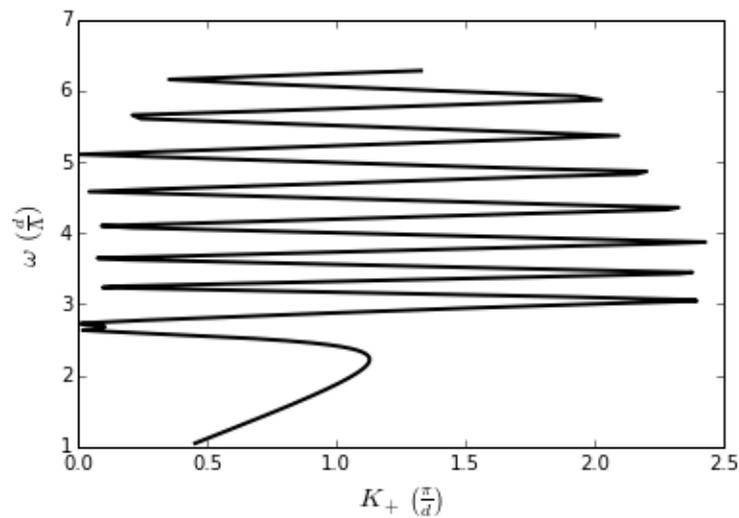


Рис. 11. Дисперсионная зависимость $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.01$

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы: обзор научной литературы по физическим свойствам фотонных кристаллов показал актуальность исследования оптических процессов в наноструктурах с фотонными кристаллами, проведённые компьютерные расчёты для наноразмерных структур с одномерными фотонными кристаллами типа АВ позволили построить графики дисперсионных зависимостей света в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа АВ, в которых наблюдалось появление фотонных запрещённых зон, свидетельствующих о специфических оптических свойствах наноструктур с фотонными кристаллами типа АВ.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что если выявить особенности оптических свойств фотонных кристаллов типа АВ, то курс квантовой оптики наноструктур можно наполнить теоретическими сведениями по фотонным кристаллам типа АВ, под-

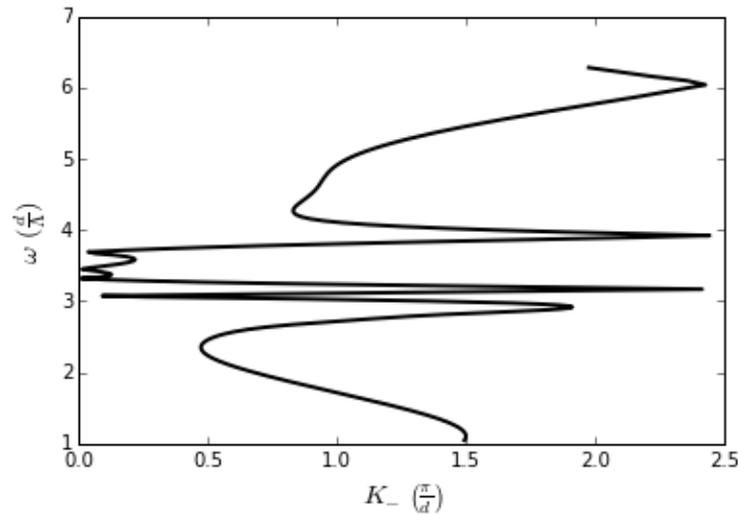


Рис. 12. Дисперсионная зависимость $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа АВ с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.01$

тверждена полностью.

Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами типа АВ в контексте квантовой оптики наноструктур имеет важное теоретическое значение для расширения понимания оптических явлений и физических процессов в фотонных кристаллах типа АВ, поскольку оно помогает лучше понимать основные физические принципы функционирования наноструктур на основе фотонных кристаллов типа АВ и взаимодействие наноструктур на основе фотонных кристаллов типа АВ с оптическим излучением. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами имеет важное практическое значение, поскольку оно может помочь в разработке новых методов и технологий, основанных на оптических свойствах наноструктур с фотонными кристаллами типа АВ, а также в создании новых оптоэлектронных приборов и устройств с улучшенными физическими характеристиками. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами типа АВ может быть использовано в различных областях физики и техники, включая нанооптику, нанофотонику, квантовую электронику.

Список использованных источников

1. Research of electrodynamic characteristics of nanophotonic structures / Genady P. Sinyavsky [et al.] // 2017 Radiation and scattering of electromagnetic waves. — IEEE, 2017. — jun. — P. 185–188. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/RSEMW.2017.8103624>.
2. Florous N. J., Koshiha M. Electrodynamics properties of photonic crystal circuits incorporating optically-active materials // 2005 Pacific Rim conference on lasers and electro-Optics. — IEEE, 2005. — P. 1136–1137. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/CLEOPR.2005.1569683>.
3. Nonlinear mechanics of photonic crystal deformable mirrors actuated via electrostatic force / A. Chowdhury [et al.] // 2015 International conference on optical MEMS and nanophotonics. — IEEE, 2015. — aug. — P. 1–2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/OMN.2015.7288877>.

4. Narasimhamurty T. S. Electro-optic effects in crystals: pockels linear electro-optic and Kerr quadratic electro-optic effects // Photoelastic and electro-optic properties of crystals. — Springer US, 1981. — P. 345–419. — ISBN: 9781475700251. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-0025-1_8.
5. Novel optical phenomena with photonic crystals / Chiyan Luo [et al.] // UV/Optical/IR space telescopes: innovative technologies and concepts / Ed. by Howard A. MacEwen. — SPIE, 2004. — jan. — P. 1–13. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.507491>.
6. Nonadiabatic dynamics of the electromagnetic field and charge carriers in high-Q photonic crystal resonators / A. M. Yacomotti [et al.] // Physical Review Letters. — 2006. — mar. — Vol. 96, no. 9. — P. 093901. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVLETT.96.093901>.
7. Vetluzhskii A. Yu., Lomukhin Yu. L. Analytical description of the electrodynamic properties of metallic photonic crystals // Optics and Spectroscopy. — 2017. — aug. — Vol. 123, no. 2. — P. 294–299. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S0030400X17080240>.
8. Dynamic photonic crystals / Shanhui Fan [et al.] // Optics and Photonics News. — 2007. — mar. — Vol. 18, no. 3. — P. 41–45. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OPN.18.3.000041>.
9. Electro-optically tunable photonic crystals / Jan H. Wülbern [et al.] // Photonic Crystal Materials and Devices III / Ed. by Ali Adibi, Shawn-Yu Lin, Axel Scherer. — SPIE, 2006. — apr. — P. 618210. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.667779>.
10. Weber Hans-J. Electrooptical effects, crystals and devices // Superhard materials, convection, and optical devices. — Springer Berlin Heidelberg, 1988. — P. 113–192. — ISBN: 9783642732058. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-73205-8_3.
11. Degen C. L., Reinhard F., Cappellaro P. Quantum sensing // Reviews of Modern Physics. — 2017. — jul. — Vol. 89, no. 3. — P. 035002. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.89.035002>.
12. Mukai Kanae, Hatano Naomichi. Discrete-time quantum walk on complex networks for community detection // Physical Review Research. — 2020. — jun. — Vol. 2, no. 2. — P. 023378. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevresearch.2.023378>.
13. Quantum key distribution using a quantum emitter in hexagonal boron nitride / Ali Al-Juboori [et al.] // Advanced Quantum Technologies. — 2023. — jun. — Vol. 6, no. 9. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/qute.202300038>.
14. Free-space quantum key distribution with single photons from defects in hexagonal boron nitride / undefinedaglar Samaner [et al.] // Advanced Quantum Technologies. — 2022. — aug. — Vol. 5, no. 9. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/qute.202200059>.
15. Dual semi-Dirac cones in three-dimensional photonic crystals / Mingyan Li [et al.] // Physical Review B. — 2024. — mar. — Vol. 109, no. 12. — P. 125432. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.109.125432>.
16. Topological magnetic transition and impedance modulation based on rotational deformations / Xiaodong Sun [et al.] // Physical Review B. — 2024. — mar. — Vol. 109, no. 9. — P. 094430. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.109.094430>.

17. Yu D., Arora S., Kuipers L. Impact of transforming interface geometry on edge states in Valley photonic crystals // *Physical Review Letters*. — 2024. — mar. — Vol. 132, no. 11. — P. 116901. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.116901>.
18. Nanophotonic structures for cavity optomechanics / Jamie M. Fitzgerald [et al.] // 2021 Conference on lasers and electro-optics Europe and European quantum electronics conference (CLEO/Europe-EQEC). — IEEE, 2021. — jun. — P. 542–576. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/CLEO/EUROPE-EQEC52157.2021.9542576>.
19. Torres-Costa Vicente. Nanostructures for photonics and optoelectronics // *Nanomaterials*. — 2022. — may. — Vol. 12, no. 11. — P. 1820. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/nano12111820>.
20. Photonic crystal nanobeam biosensors based on porous silicon / Gilberto A. Rodriguez [et al.] // *Optics Express*. — 2019. — mar. — Vol. 27, no. 7. — P. 9536. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.27.009536>.
21. Design principles for photonic crystals based on plasmonic nanoparticle superlattices / Lin Sun [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2018. — jun. — Vol. 115, no. 28. — P. 7242–7247. — URL: <http://dx.doi.org/10.1073/PNAS.1800106115>.

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

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

E-mail: alieva02regina@mail.ru

ORCID iD  0000-0003-2871-3486

Web of Science ResearcherID  AAX-8215-2021

Original article
 PACS 42.25.Bs
 OCIS 310.6628
 MSC 00A79

Investigation of the optical properties of nanostructures with one-dimensional photonic crystals of the AB type

K. K. Altunin , R. R. Alieva 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted April 11, 2024
 Resubmitted April 12, 2024
 Published June 12, 2024

Abstract. The optical properties of nanostructures with one-dimensional AB type photonic crystals are considered. A theoretical model of optical processes in nanostructures with one-dimensional AB type photonic crystals is proposed. A numerical solution to the dispersion equation for electromagnetic waves in nanostructures with one-dimensional AB type photonic crystals is obtained. Computer calculations carried out for nano-sized structures with one-dimensional photonic crystals of the AB type made it possible to construct graphs of the dispersion dependences of light in nanostructures with one-dimensional photonic crystals of the AB type, in which the appearance of photonic band gaps was observed, indicating the specific optical properties of nanostructures with photonic crystals of the AB type.

Keywords: optical radiation, photonic crystal, nanostructure, electromagnetic wave, dispersion equation, photonic band gap

References

1. Research of electrodynamic characteristics of nanophotonic structures / Genady P. Sinyavsky [et al.] // 2017 Radiation and scattering of electromagnetic waves. — IEEE, 2017. — jun. — P. 185–188. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/RSEMW.2017.8103624>.
2. Florous N. J., Koshiba M. Electrodynamics properties of photonic crystal circuits incorporating optically-active materials // 2005 Pacific Rim conference on lasers and electro-optics. — IEEE, 2005. — P. 1136–1137. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/CLEOPR.2005.1569683>.
3. Nonlinear mechanics of photonic crystal deformable mirrors actuated via electrostatic force / A. Chowdhury [et al.] // 2015 International conference on optical MEMS and nanophotonics. — IEEE, 2015. — aug. — P. 1–2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/OMN.2015.7288877>.
4. Narasimhamurty T. S. Electro-optic effects in crystals: pockels linear electro-optic and Kerr quadratic electro-optic effects // Photoelastic and electro-optic properties of crystals. — Springer US, 1981. — P. 345–419. — ISBN: 9781475700251. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-0025-1_8.

5. Novel optical phenomena with photonic crystals / Chiyun Luo [et al.] // UV/Optical/IR space telescopes: innovative technologies and concepts / Ed. by Howard A. MacEwen. — SPIE, 2004. — jan. — P. 1–13. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.507491>.
6. Nonadiabatic dynamics of the electromagnetic field and charge carriers in high-Q photonic crystal resonators / A. M. Yacomotti [et al.] // Physical Review Letters. — 2006. — mar. — Vol. 96, no. 9. — P. 093901. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVLETT.96.093901>.
7. Vetluzhskii A. Yu., Lomukhin Yu. L. Analytical description of the electrodynamic properties of metallic photonic crystals // Optics and spectroscopy. — 2017. — aug. — Vol. 123, no. 2. — P. 294–299. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S0030400X17080240>.
8. Dynamic photonic crystals / Shanhui Fan [et al.] // Optics and photonics news. — 2007. — mar. — Vol. 18, no. 3. — P. 41–45. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OPN.18.3.000041>.
9. Electro-optically tunable photonic crystals / Jan H. Wülbern [et al.] // Photonic Crystal Materials and Devices III / Ed. by Ali Adibi, Shawn-Yu Lin, Axel Scherer. — SPIE, 2006. — apr. — P. 618210. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.667779>.
10. Weber Hans-J. Electrooptical effects, crystals and devices // Superhard materials, convection, and optical devices. — Springer Berlin Heidelberg, 1988. — P. 113–192. — ISBN: 9783642732058. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-73205-8_3.
11. Degen C. L., Reinhard F., Cappellaro P. Quantum sensing // Reviews of modern physics. — 2017. — jul. — Vol. 89, no. 3. — P. 035002. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.89.035002>.
12. Mukai Kanae, Hatano Naomichi. Discrete-time quantum walk on complex networks for community detection // Physical review research. — 2020. — jun. — Vol. 2, no. 2. — P. 023378. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevresearch.2.023378>.
13. Quantum key distribution using a quantum emitter in hexagonal boron nitride / Ali Al-Juboori [et al.] // Advanced quantum technologies. — 2023. — jun. — Vol. 6, no. 9. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/qute.202300038>.
14. Free-space quantum key distribution with single photons from defects in hexagonal boron nitride / undefinedaglar Samaner [et al.] // Advanced quantum technologies. — 2022. — aug. — Vol. 5, no. 9. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/qute.202200059>.
15. Dual semi-Dirac cones in three-dimensional photonic crystals / Mingyan Li [et al.] // Physical Review B. — 2024. — mar. — Vol. 109, no. 12. — P. 125432. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.109.125432>.
16. Topological magnetic transition and impedance modulation based on rotational deformations / Xiaodong Sun [et al.] // Physical Review B. — 2024. — mar. — Vol. 109, no. 9. — P. 094430. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.109.094430>.
17. Yu D., Arora S., Kuipers L. Impact of transforming interface geometry on edge states in Valley photonic crystals // Physical Review Letters. — 2024. — mar. — Vol. 132, no. 11. — P. 116901. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.116901>.

18. Nanophotonic structures for cavity optomechanics / Jamie M. Fitzgerald [et al.] // 2021 Conference on lasers and electro-optics Europe and European quantum electronics conference (CLEO/Europe-EQEC). — IEEE, 2021. — jun. — P. 542–576. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/CLEO/EUROPE-EQEC52157.2021.9542576>.
19. Torres-Costa Vicente. Nanostructures for photonics and optoelectronics // *Nanomaterials*. — 2022. — may. — Vol. 12, no. 11. — P. 1820. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/nano12111820>.
20. Photonic crystal nanobeam biosensors based on porous silicon / Gilberto A. Rodriguez [et al.] // *Optics Express*. — 2019. — mar. — Vol. 27, no. 7. — P. 9536. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.27.009536>.
21. Design principles for photonic crystals based on plasmonic nanoparticle superlattices / Lin Sun [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2018. — jun. — Vol. 115, no. 28. — P. 7242–7247. — URL: <http://dx.doi.org/10.1073/PNAS.1800106115>.

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

Regina Ramilevna Alieva — 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: alieva02regina@mail.ru

ORCID iD  0000-0003-2871-3486

Web of Science ResearcherID  AAX-8215-2021

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 оптических свойств наноструктур с одномерными фотонными кристаллами типа АВС

К. К. Алтунин , Р. Р. Алиева  ¹

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

Поступила в редакцию 11 апреля 2024 года

После переработки 12 апреля 2024 года

Опубликована 12 июня 2024 года

Аннотация. Рассмотрены оптические свойства наноструктур с одномерными фотонными кристаллами типа АВС. Предложена теоретическая модель оптических процессов в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа АВС. Получено численное решение дисперсионного уравнения для электромагнитных волн в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа АВС. Проведённые компьютерные расчёты для наноразмерных структур с одномерными фотонными кристаллами типа АВС позволили построить графики дисперсионных зависимостей света в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа АВС, в которых наблюдалось появление фотонных запрещённых зон, свидетельствующих о специфических оптических свойствах наноструктур с фотонными кристаллами типа АВС.

Ключевые слова: оптическое излучение, показатель преломления, фотонный кристалл, наноструктура, электромагнитная волна, дисперсионное уравнение, фотонная запрещённая зона, оптические свойства наноструктур

Введение

Цель исследования состоит в том, чтобы изучить и проанализировать оптические свойства наноструктурных материалов с фотонными кристаллами типа АВС.

Задачи исследования:

1. написать обзор литературы по физическим свойствам и принципам функционирования наноструктур с фотонными кристаллами,
2. разработать модель, учитывающую влияние различных факторов (например, размера и формы наноструктур, материала, из которого они изготовлены) на оптические свойства наноструктур с фотонными кристаллами типа АВС.

¹E-mail: alieva02regina@mail.ru

Объектом исследования является группа наноструктур с одномерными фотонными кристаллами типа ABC. Предметом исследования является совокупность оптических свойств наноструктур с одномерными фотонными кристаллами типа ABC.

Гипотеза исследования заключается в том, что если выявить особенности оптических свойств фотонных кристаллов типа ABC, то курс квантовой оптики наноструктур можно наполнить теоретическими сведениями по фотонным кристаллам типа ABC.

Обзор научных работ по хиральным фотонным структурам

Хиральные наноразмерные структуры и фотонные структуры обладают уникальными оптическими свойствами, такими как двухполосный круговой дихроизм, при котором определённые состояния круговой поляризации испытывают значительное ослабление, в то время как другие проходят практически без изменений. Эти структуры, включая прямые и обратные хиральные кристаллы поленниц и хиральные брэгговские стопки, демонстрируют настраиваемый круговой дихроизм, основанный на поперечных периодах, перпендикулярных киральной оси. Кроме того, киральные интерфейсы в фотонно-кристаллических волноводах обеспечивают эффективную спин-фотонную связь и невзаимную фотонику, при этом топологические волноводы предлагают более высокие коэффициенты усиления Парселла, несмотря на некоторые потери на обратное рассеяние. Хиральные двухъядерные фотонно-кристаллические волокна были исследованы в качестве эффективных светоделителей с круговой поляризацией, демонстрирующих превосходные характеристики в управлении поляризацией и разделении длин волн для таких приложений, как мультиплексирование с круговой поляризацией в волоконной лазерной связи [1–3].

В статье [1] проведено теоретическое и численное исследование оптических свойств как прямых, так и обратных трёхмерных хиральных структур поленниц и соответствующей киральной стопки Брэгга, также известной как стопка Ройша. В статье [1] рассчитываются спектры пропускания в спиральном направлении для конечных кристаллов и фотонных зонных структур, где обеспечивается одинаковый эффективный индекс всех структур. В статье [1] обнаружено, что обе трёхмерные структуры демонстрируют двухдиапазонный круговой дихроизм, где свет с определённым состоянием круговой поляризации — либо левосторонний — обнаруживает, либо правосторонний — демонстрирует широкую стоп-зону с большим ослаблением. тогда как другое состояние поляризации передается почти беспрепятственно. Такие разрывы наблюдаются в разных частотных диапазонах с разной направленностью. Появление щелей с круговой поляризацией успешно интерпретируется с помощью физической модели, в которой круговая поляризация либо сотрудничает, либо противодействует вращению киральной структуры, тем самым эффективно приводя к пространственно-зависимому или постоянному показателю преломления и, таким образом, к наличию или отсутствию зазор. В статье [1] обнаружено, что наличие или отсутствие циркулярно поляризованных щелей регулируется поперечными периодами, перпендикулярными киральной оси, как в трёхмерных прямых, так и в обратных хиральных кристаллических структурах из поленниц. Возможность настройки кругового дихроизма может найти применение в качестве встроенных датчиков света с круговой поляризацией и внутрикристалльного обнаружения хиральных молекул.

В статье [2] количественно оценены физические характеристики обычных и топологических фотонно-кристаллических волноводов в качестве киральных интерфейсов эмиттер-фотон, а также показана способность этих структур поддерживать и усиливать направленные взаимодействия, одновременно подавляя последующие потери на обратное рассеяние. Хиральные фотонные структуры, такие как нарушенная симметрия и топологические фотонно-кристаллические волноводы в статье, поддерживают направ-

ленные взаимодействия для эффективного взаимодействия спин-фотонов и квантовых логических архитектур на кристалле. Встроенные в кристалл киральные квантовые интерфейсы света и материи, которые поддерживают направленные взаимодействия, обеспечивают многообещающую платформу для эффективного взаимодействия спин-фотон, невзаимных фотонных элементов и архитектур квантовой логики. В статье [2] представлены полноволновые трёхмерные расчёты для количественной оценки характеристик обычных и топологических фотонно-кристаллических волноводов в качестве киральных интерфейсов эмиттер-фотон. В частности, количественно оценена способность этих структур поддерживать и усиливать направленные взаимодействия, одновременно подавляя последующие потери на обратное рассеяние. Обнаружено, что волноводы с нарушенной симметрией, такие как нетопологический волновод с плоскостью скольжения и волновод с топологическим бородатым интерфейсом, действуют как эффективные киральные интерфейсы, при этом топологические режимы волновода позволяют работать при значительно более высоких коэффициентах усиления Перселла. Наконец, хотя все структуры страдают от потерь обратного рассеяния из-за несовершенства изготовления, они оказываются меньшими при высоких коэффициентах усиления топологического волновода. Эти уменьшенные потери происходят потому, что оптическая мода отталкивается от границ раздела воздух-диэлектрик, где происходит рассеяние, а не из-за какой-либо топологической защиты. Эти результаты важны для понимания взаимодействий света и материи в топологических фотонных кристаллах и разработки эффективных встроенных в кристалл киральных квантовых устройств.

В статье [3] киральное двухсердцевинное фотонно-кристаллическое волокно было исследовано как своего рода эффективный светоделитель с круговой поляризацией с использованием метода расширения киральных плоских волн. Хиральные фотонные структуры, такие как хиральное двухъядерное волокно из фотонных кристаллов, исследуются на предмет эффективных светоделителей с круговой поляризацией, демонстрируя многообещающие применения в волоконных лазерных системах связи. В зависимости от светоделителя с круговой поляризацией сочетание светоделителя с линейной поляризацией и четвертьволновой пластиной приводит к ошибке поляризации в оптоволоконной цепи с круговой поляризацией. Чтобы уменьшить эту ошибку, хиральное двухъядерное волокно из фотонных кристаллов исследуется как своего рода эффективный светоделитель с круговой поляризацией с использованием метода расширения киральных плоских волн. В статье [3] разрабатывается своего рода светоделитель с круговой поляризацией на основе хирального двухсердцевинного волокна из фотонных кристаллов с более слабой киральностью, с центральной длиной волны 1.55 мкм. Моделирование показывает превосходные характеристики за счёт более короткой длины связи и более высокого коэффициента затухания. Кроме того, двойная длина волны 1.55 мкм и 1.30 мкм с левой круговой поляризацией может быть дополнительно разделена с помощью соответствующего кирального двухсердцевинного волокна из фотонных кристаллов. Результаты показывают многообещающие применения мультиплексора и демultipлексора с круговой поляризацией в волоконных системах связи.

В статье [4] исследованы особенности распространения света в одноосных киральных жидких кристаллах с большим шагом спирали, в которых для необыкновенного луча при достаточно больших углах падения существуют запрещённые зоны.

В работе [5] описан лазер на основе полупроводникового микрорезонатора с киральным фотонным кристаллом.

В статье [6] проведены оптические исследования холестерического фотонного кристалла: измерены спектры пропускания, вращения плоскости поляризации света, поляризационные характеристики прошедшего через фотонный кристалл света. В спектрах вращения плоскости поляризации наблюдаются особенности, связанные с нали-

чем квазизапрещённой фотонной зоны. В статье [6] определена плотность фотонных состояний, её трансформация при изменении температуры и толщины фотонного кристалла.

В статье [7] исследовано распространение света в одноосных киральных жидких кристаллах с большим шагом спирали. В статье [7] проанализированы окрестности точек поворота и рассмотрен эффект прохождения необыкновенных волн через запрещённую зону.

В статье [8] предложена теоретическая модель, основанная на классическом электромагнетизме, для описания оптических свойств полостей Фабри-Перо, заполненных многослойными и линейными киральными материалами. Мы находим формальную связь между подходами на основе матрицы переноса, матрицы рассеяния и функции Грина для расчета поляризационно-зависимого оптического пропускания и сигналов кругового дихроизма, модифицированных резонатором. В статье [8] показано, как общие симметрии, такие как взаимность Лоренца и симметрия обращения времени, ограничивают моделирование таких полостей. В статье [8] применяется подход для численного и аналитического исследования свойств различных резонаторов Фабри-Перо, изготовленных из металлических или сохраняющих спиральность диэлектрических фотоннокристаллических зеркал. В последнем случае анализируется возникновение поляритонов киральной полости с точки зрения сохранения частичной спиральности электромагнитных волн, отраженных от границ зеркала. Подход, использованный в статье [8], актуален для разработки инновационных полостей Фабри-Перо для кирального зондирования и для исследования стереохимии, модифицированной полостью.

Кинковые состояния долины и киральные краевые состояния с долинной поляризацией, чьи топологически защищенные свойства имеют большой потенциал применения в высокоскоростной обработке и передаче информации, в последнее время стали важными рубежами топологической фотоники. Однако долинные фотонные топологические изоляторы в основном поддерживают топологические состояния одного типа за счёт нарушения пространственной симметрии решетки. Сосуществование различных типов топологических состояний в конкретной фотонной системе остается затруднительным. В статье [9] предложено разумно спроектированные топологические фотонные кристаллы, интегрированные в подложку (но без металлических переходных отверстий) с симметрией C_3 , которые могут поддерживать состояния долинного излома и долинно-поляризованные киральные краевые состояния в различных волноводных каналах. В статье [9] посредством численного моделирования и измерений демонстрируется устойчивая передача как состояний кинков долины, так и киральных краевых состояний с долинной поляризацией через острые углы, а также показываем высокоэффективную связь между классическими направленными волнами и топологическими волнами. Что ещё более важно, в статье [9] достигаются плавные переходы между киральными и тривиальными краевыми состояниями, тривиальными краевыми состояниями и состояниями излома долины, а также состояниями излома долины и киральными краевыми состояниями с долинной поляризацией путём соединения различных волноводных каналов. Предлагаемая в статье [9] конструкция полезна для взаимодействия с существующими функциональными фотонными волноводами или устройствами и открывает альтернативный путь для усовершенствованных планарных интегрированных топологических фотонных систем с субволновой толщиной.

Для изучения топологических фаз в фотонике, в то время как киральные краевые состояния первого порядка квантово-холловского типа обычно реализуются в магнитооптических фотонных кристаллах, топологические состояния более высокого порядка в основном исследуются в полностью диэлектрических фотонных кристаллах. В статье [10] изучаются топологические фотонные состояния первого и второго порядка в

магнитооптических фотонных кристаллах. В частности, в статье [10] вновь рассматривается простой магнитооптический фотонный кристалл с квадратной решёткой и одним гирромагнитным цилиндром в каждой элементарной ячейке. Однако вместо того, чтобы исследовать традиционную элементарную ячейку, где цилиндр находится в центре квадратной элементарной ячейки, и показано, что эта конфигурация содержит богатые топологические фазы, такие как двухзонные топологические фазы Черна, дипольные и квадрупольные топологические фазы. Подробные характеристики этих топологических состояний основаны на полосах Ванье и их поляризации с помощью методов петли Вильсона и вложенных петель Вильсона. В статье [10] подробно изучается как краевые, так и угловые состояния различных топологических фаз и показано, что они обладают особой особенностью устойчивости спектра. Например, хотя краевые и угловые состояния дипольных фаз, находящихся в запрещенной зоне, могут быть перенесены в объёмные зоны путём настройки граничных условий, они могут проходить через объёмные зоны и вновь появляться в другой запрещённой зоне. Для двухзонных квадрупольных фаз можно найти режим, в котором обе запрещённые зоны одновременно содержат набор угловых состояний, и, что интересно, аномалия заполнения одного набора угловых состояний может оставить свои следы в аномалии заполнения другого набора угловых состояний ячеек, хотя они разделены большим количеством крупных ячеек. Богатая топологическая физика, обнаруженная в простом магнитооптическом фотонном кристалле, не только даёт новое понимание топологических фаз более высокого порядка в фотонных системах с нарушенной симметрией, но и может найти многообещающие применения за счёт использования потенциалов как краёв, так и углов ячеек фотонных систем.

В статье [11] представлены результаты исследования гексагональной полости, поддерживающей киральные топологические моды шепчущей галереи, образованные гирромагнитным фотонным кристаллом. Этот режим представляет собой уникальный тип топологически защищённого состояния, демонстрирующий хиральность при распространении внутри фотонных кристаллов. Моделирование методом конечных элементов демонстрирует наличие дискретных краевых состояний внутри топологической запрещенной зоны, возникающих в результате взаимодействия киральных краевых состояний и мод шепчущей галереи. Поскольку резонатор поддерживает исключительно режимы краевого состояния с групповой скоростью в одном направлении, он может генерировать чисто бегущие режимы и остаётся невосприимчивым к интерференционным режимам. Кроме того, в статье [11] ввели дефекты и беспорядок для оценки устойчивости резонатора, продемонстрировав эффективное поддержание киральных топологических мод шепчущей галереи при различных возмущениях. В статье [11] платформа с топологическими резонаторами предлагает полезный прототип надёжных топологических фотонных устройств. В статье [11] отмечено, что существование этой моды может иметь важные последствия для таких приложений, как топологические устройства на бегущей волне и эффективные оптические соединители.

Локализация света, полезная для улучшения взаимодействия света и материи, лежит в основе исследований фотоники. Для локализации света предложены различные подходы, в том числе основанные на динамической локализации, топологических тривиальных или нетривиальных дефектах запрещённой зоны фотонных кристаллов и связанных состояниях в континууме. В статье [12] предложен инновационный метод локализации света в непрерывных системах с помощью фотонных угловых скин-мод, которые представляют собой гибридные скин-топологические моды как особый вид неэрмитова скин-эффекта второго порядка с симметрично распределёнными усилением и потерями. В частности, в статье [12] предлагается использовать слабый псевдоинверсионный симметричный коэффициент усиления и потерь, который не закрывает

запрещённую зону системы, для реализации неэрмитова фотонного изолятора Черна с киральными краевыми состояниями. Затем киральные краевые состояния накапливаются в определённых углах системы. В непрерывных системах прогнозируются такие интригующие явления, как угловые скин-моды, возникающие в результате лежащего в их основе биполярного неэрмитова скин-эффекта второго порядка, а также многоугольные скин-моды [12].

В периодических системах зонные вырождения обычно защищаются и классифицируются с помощью пространственной симметрии. Однако в фотонных системах точка Γ на нулевой частоте является внутренним вырождением из-за степени свободы поляризации электромагнитных волн. Для киральных фотонных кристаллов такое внутреннее вырождение несёт киральный топологический заряд ± 2 , имея при этом линейную зонную дисперсию, что отличается от общего представления о том, что узлы заряда 2 связаны с квадратичными дисперсиями. В статье [13] показано, что эти топологические признаки возникают из точки Вейля со спином 1 в узле тройного вырождения с нулевой частотой из-за существования электростатической плоской зоны. Такой топологический заряд на нулевой частоте обычно скрыт в выступах объёмных зон и никогда экспериментально не наблюдался. Чтобы решить эту проблему, в статье [13] вводится винтовая симметрия пространственной группы в конструкцию кирального фотонного кристалла, которая делает границу зоны Бриллюэна противоположно заряженной узловоей поверхностью, охватывающей точку Γ . В результате возникающие дуги Ферми вынуждены соединять проекции этих топологических особенностей, что позволяет их экспериментальное наблюдение. Тогда количество дуг Ферми напрямую показывает внедрённый топологический заряд на нулевой частоте [13].

Недавно обнаруженные состояния более высокого порядка значительно обогащают изучение топологических фаз, позволяя манипулировать волнами, распространяющимися или локализующимися более чем на одно измерение ниже, чем объём. На сегодняшний день обширные топологические фазы высшего порядка были продемонстрированы в фотонике, акустике, механике и электронике; однако обычно это происходит в сценариях, свободных от магнитных полей. В статье [14] сообщается о реализации магнитных угловых состояний в двумерном гиромагнитном фотонном кристалле с сотовой решёткой. Одновременно нарушая как симметрию обращения времени, так и симметрию четности с помощью одноподрешёточного магнитного смещения, в статье [14] тщательно создаётся разрыв в собственных бесцелевых киральных краевых состояниях фазы квантового Холла. В статье [14] в полных запрещённых зонах экспериментально наблюдается пара нетрадиционных угловых состояний, возникающих в результате гибридизации двух центров Ванье с образованием симметричных и антисимметричных мод. Более того, в статье [14] показано, что можно включать (выключать) локализацию угловых полей исключительно путем добавления (удаления) магнитных полей угловых узлов, не меняя при этом других конфигураций.

В статье [15] представлен подход обратного проектирования, позволяющий значительно улучшить показатели качества киральной фотоники с квантовыми эмиттерами в топологических фотонно-кристаллических пластинчатых волноводах. Начиная с топологической моды волновода с групповым индексом примерно 10 и максимальным прямым или обратным фактором Парселла в киральной точке менее 0.5, в статье [15] выполнена оптимизация направленного фактора Парселла. В статье [15] используется полностью трёхмерный метод расширения управляемых мод для эффективного расчёта свойств и мод дисперсии полос волновода, а автоматическое дифференцирование используется для расчёта градиента целевых функций. В статье [15] представлены два примера улучшенных схем: топологический режим с индексом доступной группы примерно 30 и максимальным однонаправленным фактором Перселла в киральной точке

более 4.5, что представляет собой почти 10-кратное улучшение фактора Перселла, и режим медленного света, расположенный далеко от края зоны Бриллюэна, с групповым индексом более 350 и максимальным однонаправленным фактором Парселла в киральной точке более 45.

В статье [16] показываем, что адиабатические циклы в двумерных кристаллах с исчезающими дипольными моментами (и, следовательно, с нулевым общим переносом частиц) тем не менее могут быть топологически нетривиальными. Эти циклы связаны с топологией более высокого порядка и могут быть диагностированы по их способности обеспечивать транспортировку из угла в угол на определенных платформах метаматериалов. В статье [16] экспериментально проверен перенос из угла в угол, связанный с этим топологическим насосом, используя массив фотонных волноводов, адиабатически модулированных по их расстояниям и показателям преломления. Сопоставляя продемонстрированное в статье [16] динамическое явление из двух пространственных и одного временного измерений в три пространственных измерения, наблюдения эквивалентны наблюдению киральных шарнирных состояний в трёхмерном топологическом изоляторе второго порядка.

В статье [17] на примере холестерического жидкого кристалла и рассмотрении его как многослойной стопки двулучепреломляющих пластин используется метод матрицы переноса для анализа распространения света в общей киральной среде с учетом межслоевого отражения и пропускания. В статье [17] на основе матрицы переноса распределение электрического поля может быть выражено в виде как линейно, так и циркулярно поляризованных компонентов, чтобы можно было обсудить изменение состояния поляризации света в процессе передачи. В статье [17] показано, что матрицу переноса одной и той же среды с разной киральностью можно преобразовать, лишь меняя матрицу вращения в процессе расчёта. В статье [17] рассчитаны распределения электрического поля, зонная структура, спектры пропускания и отражения при нормальном падении циркулярно-поляризованного света на холестерические жидкие кристаллы или на составные периодические структуры левосторонних и правосторонних холестерических жидких кристаллов. В статье [17] результаты, полученные с помощью этого метода матрицы переноса, хорошо согласуются с результатами, полученными методом, основанным на решении собственных значений уравнений Максвелла. Наконец, метод матрицы переноса используется для расчёта динамических пропускающих свойств холестерических жидких кристаллов под действием внешнего магнитного поля, что имеет большое значение для исследования оптических устройств бесконтактного управления. В статье [17] представленный вычислительный метод экономит вычислительное время и может быть использован для создания новых фотонных микроструктур с различными киральными средами.

Фотонно-кристаллический резонатор H1 поддерживает две вырожденные дипольные моды с ортогональной линейной поляризацией, которые могут вызывать поля с круговой поляризацией при возбуждении с разностью фаз $\pi/2$. Однако ошибки изготовления имеют тенденцию нарушать симметрию резонатора, что снимает вырождение мод, делая резонатор непригодным для поддержания круговой поляризации. В статье [18] численно продемонстрирована схема, которая вызывает киральность в модах резонатора, тем самым достигая резонатора, который поддерживает внутреннюю круговую поляризацию. Выборочно модифицируя два воздушных отверстия вокруг полости, дипольные моды могут взаимодействовать посредством асимметричного когерентного обратного рассеяния, что является неэрмитовым процессом. При подходящих параметрах воздушного отверстия моды резонатора приближаются к исключительной точке, объединяясь по частотам и ширине линий, а также вызывая значительную круговую поляризацию, близкую к единице. Направленность киральности может быть выбрана в зави-

симости от выбора модифицированных воздушных отверстий. Результаты, полученные в статье [18], подчеркивают перспективу использования фотонно-кристаллической полости H1 для кирального взаимодействия света и материи в таких приложениях, как долинатроника, спин-фотонные интерфейсы и генерация одиночных фотонов с чётко определёнными спинами.

Хиральные, топологически защищённые фотонные поверхностные квантовые состояния можно обнаружить на границе между гиротропными фотонными кристаллами, где изменяющееся магнитное поле индуцирует различную топологию на границе раздела. Обычно требуются фотонные кристаллы либо с подходящей зонной структурой по обе стороны границы раздела, обеспечивающей запрещённую зону и кратковременный распад поверхностных состояний вдали от границы раздела, либо с внешним слоем с специально разработанными свойствами материала. В статье [19] показывается возникновение топологических однонаправленных поверхностных состояний на границе конечных гиротропных фотонных кристаллов с простой квадратной решеткой и вращательной симметрией C_4 , ограниченных вакуумом, что устраняет необходимость во внешнем слое для обеспечения киральных поверхностных мод. В статье [19] рассмотрение начинается с бесконечного фотонного кристалла, нарушающего временную симметрию, с запрещённой зоной, связанной с полосами с ненулевыми числами Черна, отличными от полностью нулевых чисел Черна в воздухе. Затем мы модифицируем фотонный кристалл, чтобы переместить эту запрещённую зону ниже световой линии, сохраняя при этом разрывы числа Черна. В статье [19] расчёты зонной структуры суперячейки, аппроксимирующей фотонный кристалл, конечный в нормальном к поверхности направлении, демонстрируют существование, дисперсию и киральность поверхностной моды. Обширные расчеты прямого рассеяния для точечного источника и пространственный анализ Фурье дополнительно выявили однонаправленное топологическое состояние поверхности в свободном пространстве, которое распространяется против часовой стрелки вокруг поверхности конечного фотонного кристалла, обеспечивая почти надежный способ перекрестной проверки зонной структуры поверхностных мод не подвержено влиянию обратного рассеяния от локальных дефектов. Кроме того, в статье [19] моделирование рассеяния позволяет независимо охарактеризовать дисперсию состояний и выявить устойчивость распространения топологических плазмонных мод вокруг 90° изгибов структуры, обусловленного только утечкой излучения. В статье [19] в отличие от скрытых топологических поверхностных состояний, наблюдаемые поверхностные моды на границе раздела фотонный кристалл-воздух имеют то преимущество, что они доступны внешнему миру, что позволяет использовать преимущества толерантных к дефектам поверхностных мод без обратного рассеяния для создания эмиссии из фотонных состояний. поверхности кристаллов в произвольные формы и направления лучей в свободном пространстве.

В статье [20] выясняется, что топологические моды кольцевого резонатора, распространяющиеся вдоль границы раздела двух различных по топологии фотонных кристаллов сотового типа, могут быть использованы для достижения стабильной одномодовой генерации с максимальной интенсивностью, большей, чем у аналога моды шепчущей галереи на порядок величины.

Анализ научной литературы по фотонным кристаллам показывает актуальность темы исследования.

Теоретическая модель оптических процессов в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа ABC

Рассмотрим оптические процессы в фотонных кристаллах из периодически повторяющихся слоёв А и В, разделённых слоем С. Матрицей слоя С является SiO_2 .

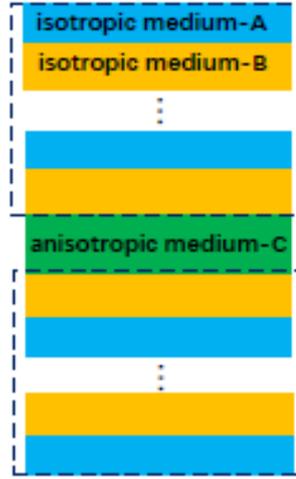


Рис. 1. Структура фотонного кристалла типа ABC

На рис. 1 приведено изображение структуры фотонного кристалла типа ABC.

Слой А имеет толщину d_A и показатель преломления n_A . Слой В имеет толщину d_B и показатель преломления n_B . Слой С имеет толщину d_C и показатель преломления n_C . Эффективная диэлектрическая проницаемость системы из трёх слоёв А, В и С описывается тензором:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_t & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_t & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_{At}d_A N + \varepsilon_{Bt}d_B N + \varepsilon_{Ct}d_C}{d}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_n = \frac{d}{d_A N / \varepsilon_{At} + d_B N / \varepsilon_{Bt} + d_C / \varepsilon_{Ct}}, \quad (3)$$

где N – число повторяющихся слоёв в структуре фотонного кристалла.

Для определения продольных компонент тензора диэлектрической проницаемости ячейки фотонного кристалла применим следующие формулы смешения:

$$\varepsilon_{At} = f_A \varepsilon_{Ai} + (1 - f_A) \varepsilon_{Am}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{Bt} = f_B \varepsilon_{Bi} + (1 - f_B) \varepsilon_{Bm}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{Ct} = f_C \varepsilon_{Ci} + (1 - f_C) \varepsilon_{Cm}. \quad (6)$$

Для определения поперечных компонент тензора диэлектрической проницаемости ячейки фотонного кристалла применим следующие формулы смешения:

$$\varepsilon_{An} = \frac{1}{\frac{f_A}{\varepsilon_{Ai}} + \frac{(1-f_A)}{\varepsilon_{Am}}}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{Bn} = \frac{1}{\frac{f_B}{\varepsilon_{Bi}} + \frac{(1-f_B)}{\varepsilon_{Bm}}}, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{Cn} = \frac{1}{\frac{f_C}{\varepsilon_{Ci}} + \frac{(1-f_C)}{\varepsilon_{Cm}}}. \quad (9)$$

Для системы включений воспользуемся формулой

$$\varepsilon_i = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (10)$$

в которой $\varepsilon_\infty = 5$, $\omega_p = 2\pi \cdot 2175$ ТГц, $\gamma = 2\pi \cdot 4.35$ ТГц.

Волновое число электромагнитной волны в слое А найдём по формуле:

$$k_A = n_A k_0 = n_A \frac{\omega}{c} = \sqrt{\varepsilon_A} \frac{\omega}{c} = n_A \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (11)$$

Волновое число электромагнитной волны в слое В найдём по формуле:

$$k_B = n_B k_0 = n_B \frac{\omega}{c} = \sqrt{\varepsilon_B} \frac{\omega}{c} = n_B \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (12)$$

Волновое число электромагнитной волны в слое С найдём по формуле:

$$k_C = n_C k_0 = n_C \frac{\omega}{c} = \sqrt{\varepsilon_C} \frac{\omega}{c} = n_C \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (13)$$

Дисперсионное соотношение электромагнитных волн в одномерном фотонном кристалле с бесконечным числом слоёв имеет вид:

$$\begin{aligned} \cos Kd = \cos k_A d_A \cos k_B d_B \cos k_C d_C - \\ - \frac{1}{2} \left(\frac{k_B}{k_A} + \frac{k_A}{k_B} \right) \left(\frac{k_C}{k_B} + \frac{k_B}{k_C} \right) \sin k_A d_A \sin k_B d_B \sin k_C d_C. \end{aligned} \quad (14)$$

Учитывая соотношения (11), (12) и (13), получаем

$$\begin{aligned} \cos Kd = \cos k_A d_A \cos k_B d_B \cos k_C d_C - \\ - \frac{1}{2} \left(\frac{n_B}{n_A} + \frac{n_A}{n_B} \right) \left(\frac{n_C}{n_B} + \frac{n_B}{n_C} \right) \sin k_A d_A \sin k_B d_B \sin k_C d_C. \end{aligned} \quad (15)$$

Выражаем

$$\begin{aligned} K = \frac{1}{d} \arccos \left(\cos k_A d_A \cos k_B d_B \cos k_C d_C - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{n_B}{n_A} + \frac{n_A}{n_B} \right) \left(\frac{n_C}{n_B} + \frac{n_B}{n_C} \right) \sin k_A d_A \sin k_B d_B \sin k_C d_C \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Дополнительные ветви дисперсионной кривой находятся из соотношений:

$$K_A = \frac{G_A}{2} \frac{k_A \Lambda}{\sqrt{\varepsilon_A + \frac{\Delta\varepsilon_A}{2}}}, \quad (17)$$

$$K_B = \frac{G_B}{2} \frac{k_B \Lambda}{\sqrt{\varepsilon_B - \frac{\Delta\varepsilon_B}{2}}}, \quad (18)$$

$$K_C = \frac{G_C}{2} \frac{k_C \Lambda}{\sqrt{\varepsilon_C - \frac{\Delta\varepsilon_C}{2}}}, \quad (19)$$

где

$$G_A = \frac{2\pi}{d_A}, \quad (20)$$

$$G_B = \frac{2\pi}{d_B}, \quad (21)$$

$$G_C = \frac{2\pi}{d_C}. \quad (22)$$

Результаты численного решения дисперсионного уравнения в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа ABC

Приведём результаты численных расчётов дисперсионной зависимости электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC.

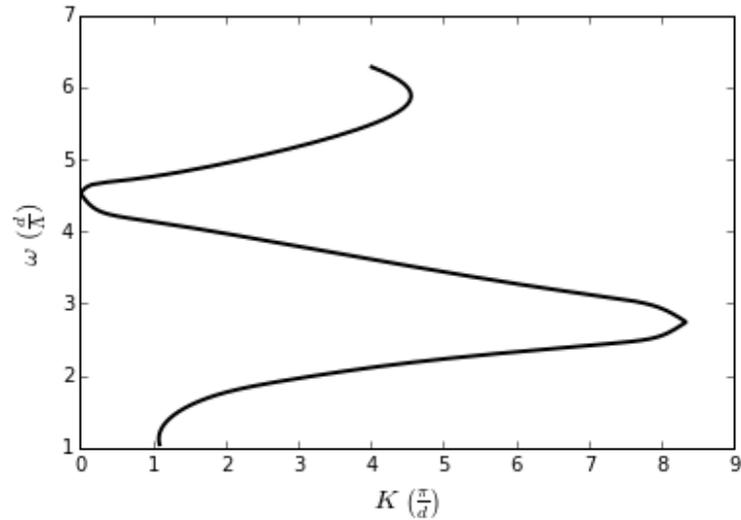


Рис. 2. Дисперсионная зависимость $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

На рис. 2 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

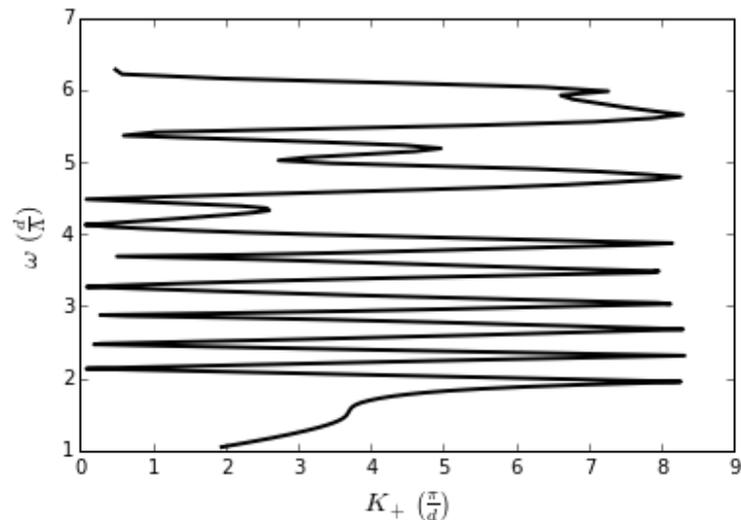


Рис. 3. Дисперсионная зависимость $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

На рис. 3 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм,

$d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

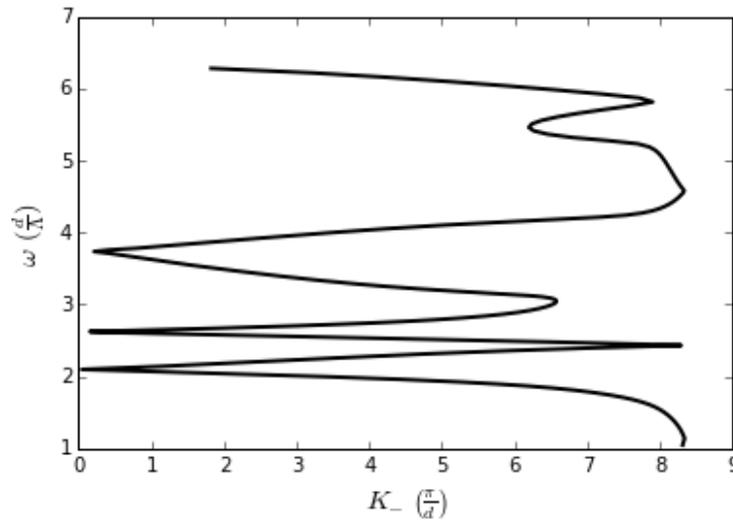


Рис. 4. Дисперсионная зависимость $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

На рис. 4 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.05$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

Изменим фактор заполнения среды А.

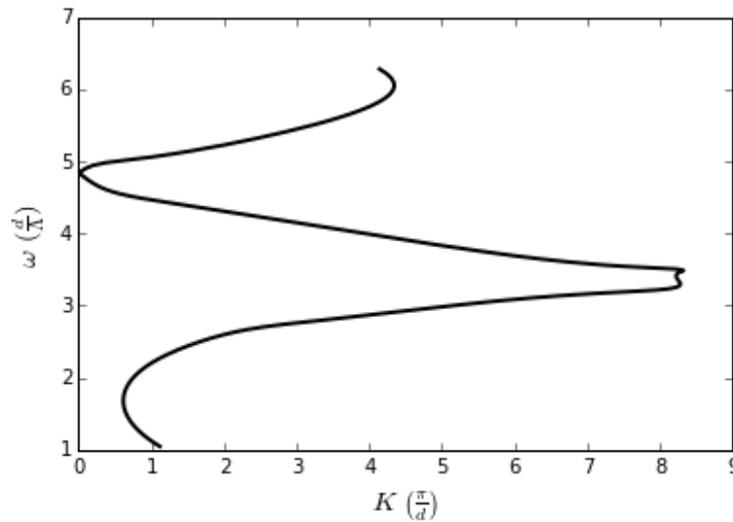


Рис. 5. Дисперсионная зависимость $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

На рис. 5 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

На рис. 6 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

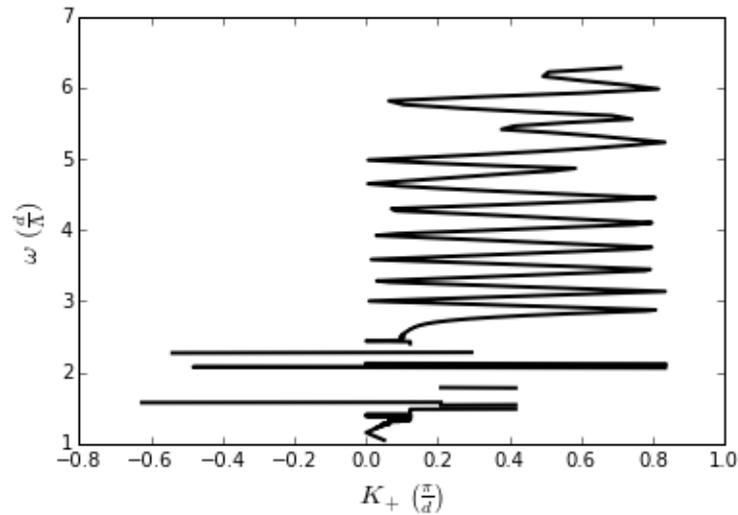


Рис. 6. Дисперсионная зависимость $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

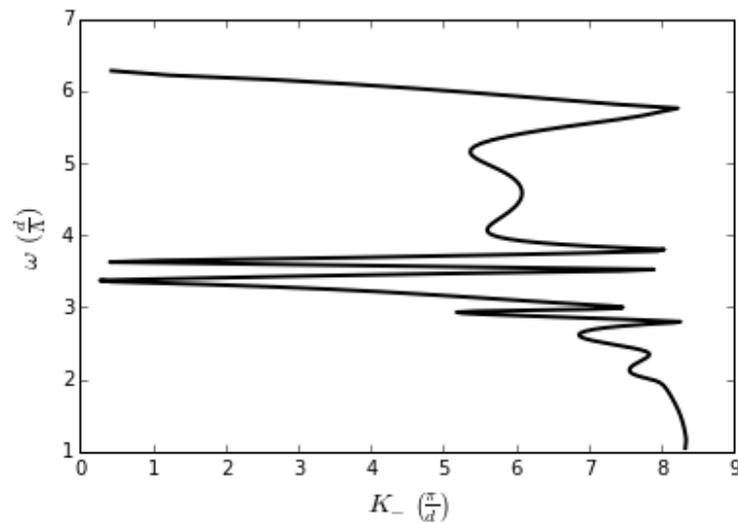


Рис. 7. Дисперсионная зависимость $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

На рис. 7 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 16$, $f_A = 0.2$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

Изменим число слоёв. Возьмём число слоёв, равным $N = 100$, для фотонного кристалла типа ABC.

На рис. 8 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

На рис. 9 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

На рис. 10 приведено изображение графика дисперсионной зависимости $\omega(K_-)$ элек-

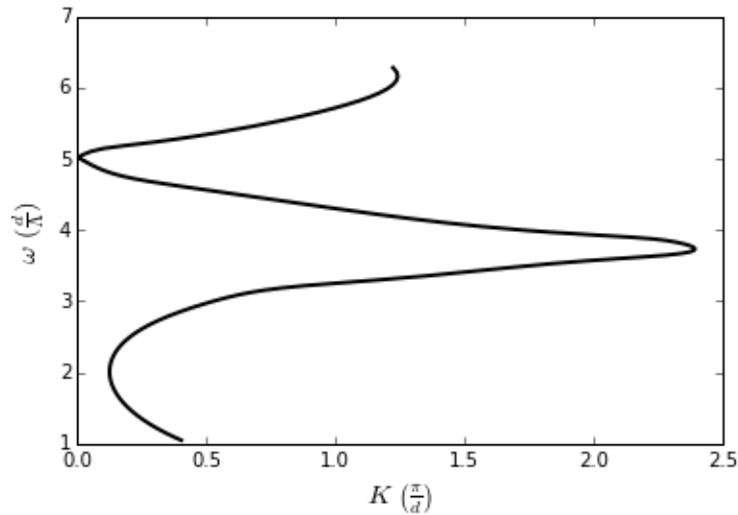


Рис. 8. Дисперсионная зависимость $\omega(K)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

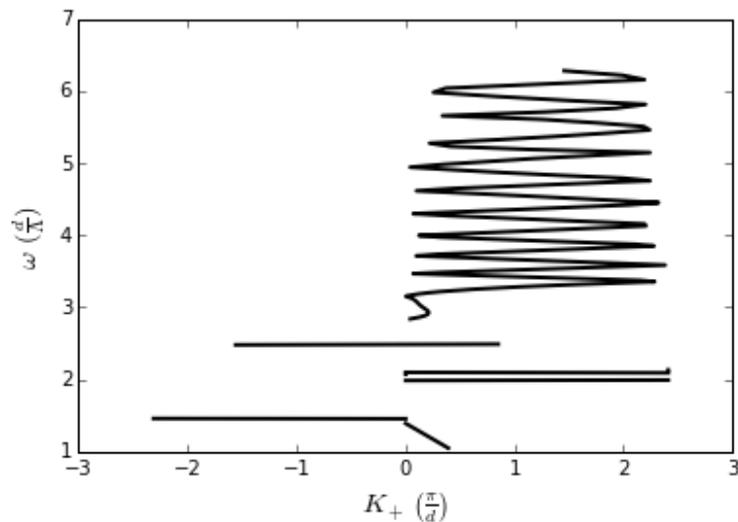


Рис. 9. Дисперсионная зависимость $\omega(K_+)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$.

Проведённые компьютерные вычисления для наноструктур с фотонными кристаллами позволили получить дисперсионные зависимости света в наноструктурах с фотонными кристаллами, в которых наблюдалось появление фотонных запрещённых зон, свидетельствующих о специфических оптических свойствах наноструктур с фотонными кристаллами.

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы: обзор научной литературы по физическим свойствам фотонных кристаллов показал актуальность исследования оптических процессов в наноструктурах с фотонными кристаллами, проведён-

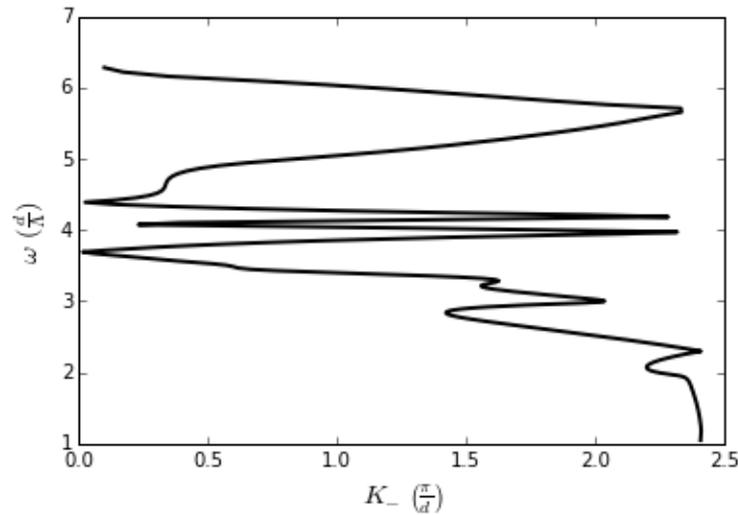


Рис. 10. Дисперсионная зависимость $\omega(K_-)$ электромагнитных волн в фотонных кристаллах типа ABC с параметрами: $\Lambda = 200$ нм, $d_A = 0.6\Lambda$, $d_B = 0.4\Lambda$, $d_C = 1.2\Lambda$, $N = 100$, $f_A = 0.3$, $f_B = 0.10$, $f_C = 0.05$

ные компьютерные расчёты для наноразмерных структур с одномерными фотонными кристаллами типа ABC позволили построить графики дисперсионных зависимостей света в наноструктурах с одномерными фотонными кристаллами типа ABC, в которых наблюдалось появление фотонных запрещённых зон, свидетельствующих о специфических оптических свойствах наноструктур с фотонными кристаллами типа ABC.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что если выявить особенности оптических свойств фотонных кристаллов типа ABC, то курс квантовой оптики наноструктур можно наполнить теоретическими сведениями по фотонным кристаллам типа ABC, подтверждена полностью.

Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами типа АВ в контексте квантовой оптики наноструктур имеет важное теоретическое значение для расширения понимания оптических явлений и физических процессов в фотонных кристаллах типа АВ, поскольку оно помогает лучше понимать основные физические принципы функционирования наноструктур на основе фотонных кристаллов типа АВ и взаимодействие наноструктур на основе фотонных кристаллов типа АВ с оптическим излучением. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами имеет важное практическое значение, поскольку оно может помочь в разработке новых методов и технологий, основанных на оптических свойствах наноструктур с фотонными кристаллами типа АВ, а также в создании новых оптоэлектронных приборов и устройств с улучшенными физическими характеристиками. Исследование оптических свойств наноструктур с фотонными кристаллами типа АВ может быть использовано в различных областях физики и техники, включая нанооптику, нанофотонику, квантовую электронику.

Список использованных источников

1. Optical properties of chiral three-dimensional photonic crystals / Shun Takahashi [et al.] // *Physical Review B*. — 2023. — apr. — Vol. 107, no. 16. — P. 165307. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.107.165307>.
2. Chiral quantum optics in broken-symmetry and topological photonic crystal waveguides / Nils Valentin Hauff [et al.] // *Physical Review Research*. — 2022. — apr. —

- Vol. 4, no. 2. — P. 023082. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevresearch.4.023082>.
3. Chiral dual-core photonic crystal fiber for an efficient circular polarization beam splitter / She Li [et al.] // *Photonics*. — 2023. — jan. — Vol. 10, no. 1. — P. 45. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/photonics10010045>.
 4. Прохождение света через запрещённую зону в киральных средах / Е. В. Аксенова [и др.] // *Оптика и спектроскопия*. — 2008. — Т. 104, № 6. — С. 1001–1012. — URL: <https://www.elibrary.ru/imqodl>.
 5. Лазер циркулярно-поляризованного излучения на основе полупроводникового микрорезонатора с киральным фотонным кристаллом / А. А. Деменев [и др.] // XIII Российская конференция по физике полупроводников. Екатеринбург, 02-06 октября 2017 года. Тезисы докладов. — Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, 2017. — С. 376–376. — URL: <https://www.elibrary.ru/xwjzwh>.
 6. Долганов П. В., Бакланова К. Д., Долганов В. К. Спектральные и поляризационные характеристики света, прошедшего через холестерический фотонный кристалл // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2020. — Т. 157, № 5. — С. 936–943. — URL: <https://www.elibrary.ru/zhvncp>.
 7. Аксенова Е. В., Крюков Е. В., Романов В. П. Особенности распространения света в киральных средах // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2007. — Т. 132, № 6. — С. 1435–1453. — URL: <https://www.elibrary.ru/iirvqj>.
 8. Classical approaches to chiral polaritonics / L. Mauro [et al.] // *Physical Review A*. — 2024. — feb. — Vol. 109, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.109.023528>.
 9. Valley kink states and valley-polarized chiral edge states in substrate-integrated topological photonic crystals / Jianfei Han [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2024. — jan. — Vol. 21, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.21.014046>.
 10. Chern, dipole, and quadrupole topological phases of a simple magneto-optical photonic crystal with a square lattice and an unconventional unit cell / Zhihao Lan [et al.] // *Physical Review B*. — 2024. — jan. — Vol. 109, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.109.045402>.
 11. Chiral topological whispering gallery modes formed by gyromagnetic photonic crystals / Yongqi Chen [et al.] // *Physical Review B*. — 2023. — nov. — Vol. 108, no. 19. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.108.195423>.
 12. Zhu Weiwei, Gong Jiangbin. Photonic corner skin modes in non-Hermitian photonic crystals // *Physical Review B*. — 2023. — jul. — Vol. 108, no. 3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.108.035406>.
 13. Intrinsic triple degeneracy point bounded by nodal surfaces in chiral photonic crystal / Dongyang Wang [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2023. — may. — Vol. 130, no. 20. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.203802>.
 14. Magnetic corner states in a two-dimensional gyromagnetic photonic crystal / Yan-Chen Zhou [et al.] // *Physical Review B*. — 2023. — jan. — Vol. 107, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.107.014105>.

15. Nussbaum Eric, Rotenberg Nir, Hughes Stephen. Optimizing the chiral Purcell factor for unidirectional single-photon emitters in topological photonic crystal waveguides using inverse design // *Physical Review A*. — 2022. — sep. — Vol. 106, no. 3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.106.033514>.
16. Higher-order topological pumping and its observation in photonic lattices / Wladimir A. Benalcazar [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — may. — Vol. 105, no. 19. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.105.195129>.
17. Transfer matrix method for light propagation in variable complex chiral media / Yu Wang [et al.] // *Physical Review E*. — 2021. — dec. — Vol. 104, no. 6. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.104.064702>.
18. Chiral modes near exceptional points in symmetry broken H1 photonic crystal cavities / C. F. Fong [et al.] // *Physical Review Research*. — 2021. — nov. — Vol. 3, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.043096>.
19. Chiral topological surface states on a finite square photonic crystal bounded by air / Anna C. Tasolamprou [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2021. — oct. — Vol. 16, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.044011>.
20. Sun Xiao-Chen, Hu Xiao. Topological ring-cavity laser formed by honeycomb photonic crystals // *Physical Review B*. — 2021. — jun. — Vol. 103, no. 24. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.103.245305>.

Сведения об авторах:

Константин Константинович Алтуни — 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

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

E-mail: alieva02regina@mail.ru

ORCID iD  0000-0003-2871-3486

Web of Science ResearcherID  AAX-8215-2021

Original article
PACS 42.25.Bs
OCIS 310.6628
MSC 00A79

Investigation of the optical properties of nanostructures with one-dimensional photonic crystals of the ABC type

K. K. Altunin , R. R. Alieva 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted April 11, 2024
Resubmitted April 12, 2024
Published June 12, 2024

Abstract. The optical properties of nanostructures with one-dimensional ABC type photonic crystals are considered. A theoretical model of optical processes in nanostructures with one-dimensional photonic crystals of the ABC type is proposed. A numerical solution to the dispersion equation for electromagnetic waves in nanostructures with one-dimensional photonic crystals of the ABC type is obtained. Computer calculations carried out for nanoscale structures with one-dimensional photonic crystals of the ABC type made it possible to construct graphs of the dispersion dependences of light in nanostructures with one-dimensional photonic crystals of the ABC type, in which the appearance of photonic band gaps was observed, indicating the specific optical properties of nanostructures with photonic crystals of the ABC type.

Keywords: optical radiation, refractive index, photonic crystal, nanostructure, electromagnetic wave, dispersion equation, photonic band gap, optical properties of nanostructures

References

1. Optical properties of chiral three-dimensional photonic crystals / Shun Takahashi [et al.] // *Physical Review B*. — 2023. — apr. — Vol. 107, no. 16. — P. 165307. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.107.165307>.
2. Chiral quantum optics in broken-symmetry and topological photonic crystal waveguides / Nils Valentin Hauff [et al.] // *Physical Review Research*. — 2022. — apr. — Vol. 4, no. 2. — P. 023082. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevresearch.4.023082>.
3. Chiral dual-core photonic crystal fiber for an efficient circular polarization beam splitter / She Li [et al.] // *Photonics*. — 2023. — jan. — Vol. 10, no. 1. — P. 45. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/photonics10010045>.
4. Transmission of light through the band gap in chiral media / E. V. Aksenova [et al.] // *Optics and spectroscopy*. — 2008. — Vol. 104, no. 6. — P. 1001–1012. — URL: <https://www.elibrary.ru/imqodl>.

5. Laser of circularly polarized radiation based on a semiconductor microcavity with a chiral photonic crystal / A. A. Demenev [et al.] // XIII Russian conference on semiconductor physics. Ekaterinburg, October 02-06, 2017. Abstracts of reports. — Institute of Metal Physics named after M. N. Mikheev Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2017. — P. 376–376. — URL: <https://www.elibrary.ru/xwjzwh>.
6. Dolganov P.V., Baklanova K.D., Dolganov V.K. Spectral and polarization characteristics of light passed through a cholesteric photonic crystal // Journal of experimental and theoretical physics. — 2020. — Vol. 157, no. 5. — P. 936–943. — URL: <https://www.elibrary.ru/zhvncp>.
7. Aksenova E. V., Kryukov E. V., Romanov V. P. Features of light propagation in chiral media // Journal of experimental and theoretical physics. — 2007. — Vol. 132, no. 6. — P. 1435–1453. — URL: <https://www.elibrary.ru/iirvqj>.
8. Classical approaches to chiral polaritonics / L. Mauro [et al.] // Physical Review A. — 2024. — feb. — Vol. 109, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.109.023528>.
9. Valley kink states and valley-polarized chiral edge states in substrate-integrated topological photonic crystals / Jianfei Han [et al.] // Physical Review Applied. — 2024. — jan. — Vol. 21, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.21.014046>.
10. Chern, dipole, and quadrupole topological phases of a simple magneto-optical photonic crystal with a square lattice and an unconventional unit cell / Zhihao Lan [et al.] // Physical Review B. — 2024. — jan. — Vol. 109, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.109.045402>.
11. Chiral topological whispering gallery modes formed by gyromagnetic photonic crystals / Yongqi Chen [et al.] // Physical Review B. — 2023. — nov. — Vol. 108, no. 19. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.108.195423>.
12. Zhu Weiwei, Gong Jiangbin. Photonic corner skin modes in non-Hermitian photonic crystals // Physical Review B. — 2023. — jul. — Vol. 108, no. 3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.108.035406>.
13. Intrinsic triple degeneracy point bounded by nodal surfaces in chiral photonic crystal / Dongyang Wang [et al.] // Physical Review Letters. — 2023. — may. — Vol. 130, no. 20. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.203802>.
14. Magnetic corner states in a two-dimensional gyromagnetic photonic crystal / Yan-Chen Zhou [et al.] // Physical Review B. — 2023. — jan. — Vol. 107, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.107.014105>.
15. Nussbaum Eric, Rotenberg Nir, Hughes Stephen. Optimizing the chiral Purcell factor for unidirectional single-photon emitters in topological photonic crystal waveguides using inverse design // Physical Review A. — 2022. — sep. — Vol. 106, no. 3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.106.033514>.
16. Higher-order topological pumping and its observation in photonic lattices / Wladimir A. Benalcazar [et al.] // Physical Review B. — 2022. — may. — Vol. 105, no. 19. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.105.195129>.

17. Transfer matrix method for light propagation in variable complex chiral media / Yu Wang [et al.] // *Physical Review E*. — 2021. — dec. — Vol. 104, no. 6. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.104.064702>.
18. Chiral modes near exceptional points in symmetry broken H1 photonic crystal cavities / C. F. Fong [et al.] // *Physical Review Research*. — 2021. — nov. — Vol. 3, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.043096>.
19. Chiral topological surface states on a finite square photonic crystal bounded by air / Anna C. Tasolamprou [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2021. — oct. — Vol. 16, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.044011>.
20. Sun Xiao-Chen, Hu Xiao. Topological ring-cavity laser formed by honeycomb photonic crystals // *Physical Review B*. — 2021. — jun. — Vol. 103, no. 24. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.103.245305>.

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

Regina Ramilevna Alieva — 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: alieva02regina@mail.ru

ORCID iD  0000-0003-2871-3486

Web of Science ResearcherID  AAX-8215-2021

Секция 2

Науки об образовании

2.1 Теория и методика обучения и воспитания

Научная статья

УДК 372.853

ББК 74.489

ГРНТИ 14.35.09

ВАК 5.8.2.

PACS 01.40.-d

OCIS 000.2060

MSC 00A79

Исследование методики преподавания курса нанооптики в педагогическом университете

К. К. Алтунин , Е. С. Сорокина  ¹

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

Поступила в редакцию 22 апреля 2024 года

После переработки 24 апреля 2024 года

Опубликована 12 июня 2024 года

Аннотация. Представлены результаты педагогического эксперимента по апробации методики преподавания курса нанооптики, включающую использование современных информационных технологий, на специальностях физико-математического профиля педагогического направления подготовки в педагогическом университете. В результате проведённого педагогического эксперимента получены положительные результаты апробации методики преподавания курса нанооптики в педагогическом университете.

Ключевые слова: нанооптика, курс нанооптики, педагогический эксперимент, апробация методики преподавания, педагогический университет

¹E-mail: ksorokina2001@mail.ru

Введение

В современной эпохе быстрого развития науки и технологий невозможно переоценить значение нанотехнологий и оптики. Комбинация этих двух областей даёт возможность создания уникальных материалов, устройств и систем, повышает эффективность процессов в различных отраслях промышленности и науки. В связи с этим актуальной становится задача подготовки специалистов с педагогическим образованием, обладающих теоретическими знаниями в области нанооптики. Преподавание учебной дисциплины по нанооптике требует особого подхода и методики, учитывающих специфику учебной дисциплины по нанооптике. Актуальность исследования методики преподавания курса нанооптики в педагогическом университете обусловлена необходимостью развития научного и технического образования, а также подготовки высококвалифицированных специалистов в области нанотехнологий.

Цель исследования заключается в апробации методики преподавания курса нанооптики, которая позволит студентам получить глубокие знания и навыки в области нанооптики, а также развить критическое мышление и творческие способности. Задачи исследования состоят в том, чтобы проанализировать современное состояние научных работ по наноразмерным системам и устройствам, апробировать методику преподавания курса нанооптики, включающую использование современных информационных технологий, на базе педагогического университета.

Объектом исследования является процесс обучения студентов педагогического университета курсу нанооптики. Предметом исследования является методика преподавания курса нанооптики, основанная на использовании современных информационных технологий.

Методы исследования включают анализ научной литературы, педагогический эксперимент, наблюдение и статистическую обработку данных. Материалы исследования включают учебные планы, программы курсов, методические разработки, а также результаты педагогического эксперимента по апробации методики преподавания курса нанооптики в педагогическом университете.

Научная новизна исследования заключается в том, что предложен новый подход к преподаванию курса нанооптики, основанный на использовании современных образовательных технологий, разработана методика преподавания курса нанооптики, включающая использование информационных технологий, проведена апробация разработанной методики на базе педагогического университета и получены положительные результаты апробации методики преподавания курса нанооптики в педагогическом университете.

Гипотеза исследования заключается в том, что если применять разработанную методику преподавания курса нанооптики, то можно повысить качество обучения студентов, развить их профессиональные компетенции и подготовить высококвалифицированных специалистов в области нанотехнологий.

Теоретическая значимость исследования заключается в разработке нового подхода к преподаванию курса нанооптики, который может быть использован в других педагогических университетах и способствовать развитию педагогического образования с физико-техническим профилем подготовки. Практическая значимость исследования состоит в возможности применения разработанной методики преподавания курса нанооптики в педагогической практике, что позволит повысить качество обучения студентов и подготовить высококвалифицированных специалистов в области педагогического образования, владеющих теоретическими основами нанотехнологий и оптических технологий наноструктур.

Обзор работ по наноразмерным системам и устройствам

Наномеханика произвела революцию в изучении колебаний и вибраций на мезоскопическом уровне, внося нелинейности и значительные флуктуации из-за небольшого масштаба наномеханических систем [1]. Наномеханические системы на наноуровне демонстрируют мезоскопическую физику, включающую значительные флуктуации, нелинейные вибрации и уникальные механизмы диссипации, предлагая платформу для изучения классических и квантовых явлений, далеких от равновесия [1]. Эти системы обеспечивают точный контроль, позволяя исследовать явления классической и квантовой физики, далёкие от теплового равновесия, в хорошо изученной среде. Эта область охватывает широкий спектр явлений, включая консервативные и диссипативные нелинейности, флуктуации и эффекты периодического движения, нарушение симметрии перемещения во времени и детального баланса, что приводит к бистабильности и мультистабильности [2, 3]. В работе [2] представлена мультифизическая система манипуляций нанороботами для прототипирования передовых наноразмерных устройств и определения характеристик просвечивающей электронной микроскопии на месте с использованием различных физических стимулов, таких как частицы, волны, поля и силы. Кроме того, была предложена мультифизическая платформа для улучшения манипуляций нанороботами и просвечивающей электронной микроскопии, что позволяет создавать прототипы и характеристики современных устройств на атомных уровнях с использованием различных физических стимулов, таких как частицы, волны, поля и силы.

Нанотехнологии в энергетических системах используют фундаментальные физические принципы на наноуровне, повышая эффективность за счёт графена, нанотрубок и солнечных элементов, совершая революцию в производстве и хранении энергии [4]. Энергосистемы передают энергию нагрузкам, выполняющим определенную функцию, таким образом, что не возникает барьера электропроводности. Производство энергии с помощью систем, основанных на нанотехнологиях, очень эффективно. Они производятся методами лазерной абляции и осаждения из паровой фазы. Использование графена эффективно для наполнения энергетических систем, поскольку он обладает такими физическими характеристиками, как подвижность электронов, высокая проводимость. Солнечные элементы, которые преобразуют энергию, поступающую от Солнца, в электрическую форму, поскольку на этот процесс сильно влияет фотоэлектрическое влияние. В работе [4] разработан конденсатор с комбинацией нанотрубок, которые увеличивают площадь поверхности электрода и, следовательно, количество энергии. Нанотехнологии могут быть использованы для производства дешевых и высокоэффективных солнечных элементов. Наноконденсаторы также работают на основе физико-химических свойств материалов как электрода, так и электролита. Нанотехнологии могут быть использованы в производстве различных электрических и коммерческих приборов [4].

Физические открытия в наноплазмонных системах достигаются посредством автономных экспериментов с использованием глубокого обучения ядра, что позволяет получить физическое представление о сканирующей просвечивающей электронной микроскопии для наномасштабных исследований [5]. Открытия, основанные на физике в ходе автономного эксперимента, стали мечтой о применении машинного обучения в физических науках. В статье [5] разрабатывается и экспериментально реализуется рабочий процесс глубокого обучения ядра, сочетающий в себе корреляционное предсказание целевого функционального ответа и его неопределённости на основе структуры, а также основанный на физике выбор функции сбора данных, которая автономно управляет навигацией в пространстве изображений. По сравнению с классическими методами байесовской оптимизации этот подход позволяет улавливать сложные пространственные

особенности, присутствующие в изображениях реалистичных материалов, и динамически изучать взаимосвязи структура-свойство. В сочетании с гибкой функцией скаляризатора, которая позволяет приписывать степень физического интереса предсказанным спектрам, это позволяет осуществлять физические открытия в автоматизированных экспериментах. В статье [5] этот подход проиллюстрирован для наноплазмонных исследований наночастиц и экспериментально реализован по-настоящему автономным образом для обнаружения объёмных и краевых плазмонов в MnPS_3 , менее известном светочувствительном слоистом двумерном материале. Этот подход является универсальным, может быть непосредственно использован с любым образцом в исходном виде и, как ожидается, будет применим к любым методам зондовой микроскопии, включая другие методы сканирующей туннельной электронной микроскопии, сканирующую зондовую микроскопию, химическую и оптическую визуализацию.

В статье [6] описаны результаты, полученные в лаборатории наномасштабной физики на базе микроскопа, специализирующегося на технологиях на основе атомной сканирующей микроскопии, сканирующей туннельной микроскопии, рамановской спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии, наноразмерной 3D-печати и измерениях свойств материалов, продвигая физику на наноуровне.

Термин «наносистема» относится к системе, по крайней мере, с одним пространственным измерением, уменьшенным до нанометрового масштаба (с размером меньше 100 нм), и включает нульмерные системы (такие как металлические, полупроводниковые и керамические наночастицы), одномерные системы (такие как нанопроволоки, нанотрубки и наностержни) и двумерные структуры (тонкие плёнки или пластины) [7]. Наноразмерные системы включают нульмерные наночастицы, одномерные нанопроволоки, нанотрубки, наностержни и двумерные тонкие плёнки. Эти системы имеют фундаментальное значение для наноматериалов и квантовых моделей [7].

Физика наноразмерных систем включает междисциплинарные исследования самоорганизации, самосборки, стабильности и свойств наноскопических и мезоскопических структур, изучение классических и квантовых принципов в живой и неживой материи [8]. Различные аспекты структурообразования и динамики живой и неживой материи на наноуровне представляют собой междисциплинарную область, вызывающую быстро растущий исследовательский интерес как экспериментаторов, так и теоретиков [8].

В статье [9] наноразмерное магнитное устройство, вдохновленное нейронами, было разработано для эффективных вычислений, демонстрируя потенциал для продвинутой обработки информации, выходящий за рамки традиционных компьютеров в физике. Для распознавания аудиосигналов было использовано наноразмерное магнитное устройство, имитирующее поведение нейронов. Такое устройство можно было бы адаптировать для решения задач с большей эффективностью, чем обычные компьютеры. Нейроморфные вычисления используют исключительные возможности биологического мозга по обработке информации и пытаются создать искусственные нейроны, синапсы и сети для решения конкретных задач, которые являются сложными или энергоёмкими для обычных компьютеров, таких как распознавание изображений и закономерностей в сенсорных сигналах. В статье [9] используют магнитные наногенераторы, чтобы имитировать нелинейное колебательное поведение нейронов и проверять способность таких устройств распознавать аудиосигналы. Система была обучена распознавать произносимые цифры пяти разных голосов из эталонной базы данных и могла делать это с точностью, сравнимой с современным машинным обучением. Работа [9] открывает новое направление для маломощной обработки информации, подобной мозгу, на базе чипов.

Физика на наноуровне демонстрирует уникальное поведение из-за изменённых физических характеристик, что приводит к нетрадиционным реакциям, таким как эффекты памяти в электронных системах и изменения механических свойств в наноструктурах

[10]. В наномасштабе физика следует знакомым принципам, которые приводят к незнакомым и даже маловероятным реакциям. Изменение баланса ряда физических характеристик приводит к поведению, которое может сильно отличаться от поведения тех же материалов на макроуровне. В работе [10] рассматриваются некоторые эффекты памяти, которые вызывают растущий интерес в исследованиях наноразмерных электронных систем. Работа [10] строится на знакомой предпосылке, что внешние возмущения не могут оказать мгновенного воздействия на любую конденсированную систему. Это тем более справедливо для систем наноразмеров, где динамика нескольких атомов может существенно повлиять на всю структуру. Таким образом, в работе [10] объясняется, что реакция этих систем всегда будет иметь некоторую степень присутствия памяти, и что мемристивные, мемемёмкостные и меминдуктивные системы являются просто примерами, где эта особенность особенно выражена.

В работе [11] рассматриваются математические темы, необходимые для изучения электронного транспорта в наноразмерных системах, включая векторное исчисление, преобразование Фурье, квантовую механику, функцию Грина и вторичное квантование.

Физика в наносистемах включает в себя квантовые эффекты, доминирующие на нанометровых размерах, изменяющие такие свойства, как электрическое, оптическое и тепловое поведение, что имеет решающее значение для разработки передовых оптоэлектронных устройств.

Наноразмерные устройства относятся к миниатюрным приборам, в которых свойства полупроводников настраиваются на наноуровне, что приводит к уникальным физическим характеристикам, не наблюдаемым в макроскопических системах [12]. Наноразмерные устройства демонстрируют уникальные свойства, обусловленные индивидуальной архитектурой, что приводит к новым физическим характеристикам [12]. Понимание электронных и фотонных взаимодействий имеет решающее значение для разработки передовых наноразмерных полупроводниковых приборов [12]. Наноразмерные устройства играют решающую роль в различных областях, включая фотонику и электронику. Например, байесовские нейронные сети извлекают выгоду из наноразмерных мемристивных устройств, таких как память с фазовым изменением, для эффективной аппаратной реализации, снижения требований к ресурсам при сохранении точности. Наномасштабная фотоника включает в себя формирование структуры полупроводников в субмикронных масштабах, что позволяет создавать сверхбыстрые оптические затворы и другие современные устройства с минимальным энергопотреблением и небольшими размерами [13]. В статье [13] обсуждаются наноразмерные фотонные устройства, такие как фотонно-кристаллический оптический параметрический генератор. Эти устройства имеют требования к мощности в микроваттах, размер микрометра и полосу пропускания в несколько ГГц, подходящие для квантовых приложений. Кроме того, устройства, содержащие скирмионы, перспективны для низкоэнергетического хранения данных, поскольку сложная геометрия влияет на поведение и контроль скирмионов внутри структур [14]. Наномасштабные структуры, подобные устройствам FeGe, были изучены для удержания блоховских скирмионов, влияя на поведение и формирование скирмионов в более низких магнитных полях по сравнению с простыми формами [14]. В усовершенствованных нанотранзисторах, таких как многозатворные наномоптранзисторы и туннельные транзисторы, используются инновационные материалы и архитектуры для повышения производительности и решения проблем, с которыми столкнутся будущие наноэлектронные устройства [15]. Наноразмерные устройства, такие как многозатворные наномоптранзисторы, туннельные транзисторы и гибридные наноконтакты с инновационными материалами, решают проблемы энергопотребления, производительности, изменчивости и надёжности [15]. В статье [16] предлагается наноразмерное электронное устройство переменной площади, использующее наномембраны для изменения геометрии

рии контактов и подачи тока в электронные переходы, повышая чувствительность к давлению.

В статье [17] предлагается новый метод для моделирования физических свойств наноразмерных устройств с использованием сохраняющего аналитического продолжения в рамках теории неравновесных функций Грина, способствующего сходимости и сохранения законов сохранения. В статье [17] предлагается альтернативный подход к самосогласованности и законам сохранения в теории неравновесных функций Грина, который обеспечивает бесконечное семейство сохраняющихся, но, вообще говоря, несамосогласованных приближений. В статье [17] показано, что в любом Φ -выводимом приближении ассоциированный ряд Борна для неравновесной функции Грина сохраняется. Значения математических ожиданий, рассчитанные по ряду Борна, затем используются для построения таблицы аппроксимаций Паде, при этом законы сохранения естественным образом сохраняются. В статье [17] показано, что эта техника реализуется для Φ -выводимого самосогласованного борновского приближения, для которого получаем рекуррентное соотношение, которое дает ряд Борна для неравновесной функции Грина до любого желаемого порядка. Значения математических ожиданий, рассчитанные на основе ряда Борна, затем подвергаются постобработке для построения таблицы Паде сохраняющихся аппроксимаций. Расчёт самосогласованного фототока борновского приближения в смещенной модели молекулярного соединения представляет собой пример, когда в дополнение к законам сохранения достигается существенное ускорение сходимости по сравнению со стандартными методами. Настоящая переформулировка самосогласованного борновского приближения может способствовать сходимости к полностью самосогласованным результатам в широком круге задач.

В работе [18] основное внимание уделяется проверке параметров модели устройства для наноразмерных МОП-транзисторов и предлагается подход с использованием поправочных коэффициентов для рассмотрения механизмов квантовомеханического транспорта в МОП-транзисторах с длиной канала, равной 90 нм.

В ходе исследования были проанализированы различные литературные источники, что позволило накопить обширные теоретические материалы по курсу нанооптики.

Результаты педагогического эксперимента по нанооптике

Педагогический эксперимент по нанооптике проводился на очном отделении факультета физико-математического и технологического образования в ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова» для студентов группы ФМ-19, обучающихся по направлению подготовки по педагогическому образованию с профилем по физике и математике с 1 сентября 2023 года по 22 января 2024 года. Для проведения педагогического эксперимента была выбрана первая подгруппа академической группы ФМ-19. Согласно выбранной схеме педагогического эксперимента по избранным занятиям дисциплины по выбору «Нанооптика» внедрялись разработанные элементы тематического модуля по нанооптике из дистанционного курса по наноэлектронике в образовании. Материалы и элементы тематического модуля по нанооптике были внедрены на четырёх занятиях по курсу нанооптики. Материалы и элементы тематического модуля связаны с анализом новых подходов и методов расчёта оптических характеристик с квантовыми точками. В педагогическом эксперименте по нанооптике приняло участие 6 студентов из первой подгруппы академической группы ФМ-19. Общая трудоёмкость курса нанооптики в 2023-2024 учебном году составляет 2 зачётные единицы трудоёмкости. При оценивании студентов на занятиях использовалась рейтинговая система оценивания, принятая в университете. Максимальная итоговая сумма баллов по курсу нанооптики составляет 200 баллов.

Занятие 1 по курсу нанооптики было проведено 2.10.2023 по теме, связанной с изу-

чением отражения и пропускания света на границе раздела наноструктур с квантовыми точками. Согласно рейтинговой системы оценивания максимальное количество баллов на занятии 1 составляет 13 баллов. Студент ФМ-19-02 на занятии 1 по курсу нанооптики заработал 13 баллов, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-04 на занятии 1 по курсу нанооптики заработал 8 баллов, что соответствует отметке «удовлетворительно». Студент ФМ-19-11 на занятии 1 по курсу нанооптики заработал 7 баллов, что соответствует отметке «удовлетворительно». Студент ФМ-19-20 на занятии 1 по курсу нанооптики заработал 13 баллов, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-24 на занятии 1 по курсу нанооптики заработал 7 баллов, что соответствует отметке «удовлетворительно». Студент ФМ-19-23 на занятии 1 по курсу нанооптики заработал 13 баллов, что соответствует отметке «отлично». По результатам проведения занятия 1 по нанооптике студенты первой подгруппы академической группы ФМ-19 получили 3 отметки «отлично», 3 отметки «удовлетворительно». На занятии 1 по курсу нанооптики, проведённом 2.10.2023, абсолютная успеваемость студентов составила 100 %, что соответствует оптимальному уровню абсолютной успеваемости. На занятии 1 по курсу нанооптики, проведённом 2.10.2023, качественная успеваемость студентов составила 50 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. На занятии 1 по курсу нанооптики, проведённом 2.10.2023, степень обученности студентов составила 68 %, что соответствует оптимальному уровню степень обученности. На занятии 1 по курсу нанооптики, проведённом 2.10.2023, высший уровень требований составил 68 %, средний уровень требований составил 40 %, низший уровень требований составил 20 %. На занятии 1 по курсу нанооптики, проведённом 2.10.2023, среднее значение отметок по пятибалльной шкале равно 4.0. На занятии 1 по курсу нанооптики, проведённом 2.10.2023, экспериментальное значение суммы хи-квадрат равно 9.0, что меньше критического значения для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01, равного 15.086, поэтому первая гипотеза выполняется.

Занятие 2 по курсу нанооптики было проведено 9.10.2023 по теме, связанной с изучением отражения и пропускания света на границе раздела нанокompозитных структур с квантовыми точками. Согласно рейтинговой системы оценивания максимальное количество баллов на занятии 2 составляет 13 баллов. Студент ФМ-19-02 на занятии 2 по курсу нанооптики заработал 13 баллов, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-04 на занятии 2 по курсу нанооптики заработал 13 баллов, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-11 на занятии 2 по курсу нанооптики заработал 7 баллов, что соответствует отметке «удовлетворительно». Студент ФМ-19-20 на занятии 2 по курсу нанооптики заработал 13 баллов, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-24 на занятии 2 по курсу нанооптики заработал 7 баллов, что соответствует отметке «удовлетворительно». Студент ФМ-19-23 на занятии 2 по курсу нанооптики заработал 13 баллов, что соответствует отметке «отлично». По результатам проведения занятия 2 по нанооптике студенты первой подгруппы академической группы ФМ-19 получили 4 отметки «отлично», 2 отметки «удовлетворительно». На занятии 2 по курсу нанооптики, проведённом 9.10.2023, абсолютная успеваемость студентов составила 100 %, что соответствует оптимальному уровню абсолютной успеваемости. На занятии 2 по курсу нанооптики, проведённом 9.10.2023, качественная успеваемость студентов составила 66.7 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. На занятии 2 по курсу нанооптики, проведённом 9.10.2023, степень обученности студентов составила 78.7 %, что соответствует оптимальному уровню степень обученности. На занятии 2 по курсу нанооптики, проведённом 9.10.2023, высший уровень требований составил 78.7 %, средний уровень требований составил 48.7 %, низший уровень требований составил 25.3 %. На занятии 2 по курсу нанооптики, проведённом 9.10.2023, среднее значение отметок по пятибалльной шкале равно 4.333. На занятии 2 по курсу нанооптики,

проведённом 9.10.2023, экспериментальное значение суммы хи-квадрат равно 10.667, что меньше критического значения для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01, равного 15.086, поэтому первая гипотеза выполняется.

Занятие 3 по курсу нанооптики было проведено 9.10.2023 по теме, связанной с изучением приближения эффективной среды для нанокompозитных сред с квантовыми точками, описываемых формулами Максвелл-Гарнетта и Бруггемана. Согласно рейтинговой системы оценивания максимальное количество баллов на занятии 3 составляет 13 баллов. Студент ФМ-19-02 на занятии 3 по курсу нанооптики заработал 13 баллов, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-04 на занятии 3 по курсу нанооптики заработал 13 баллов, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-11 на занятии 3 по курсу нанооптики заработал 7 баллов, что соответствует отметке «удовлетворительно». Студент ФМ-19-20 на занятии 3 по курсу нанооптики заработал 13 баллов, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-24 на занятии 3 по курсу нанооптики заработал 13 баллов, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-23 на занятии 3 по курсу нанооптики заработал 13 баллов, что соответствует отметке «отлично». По результатам проведения занятия 3 по нанооптике студенты первой подгруппы академической группы ФМ-19 получили 5 отметок «отлично», 1 отметка «удовлетворительно». На занятии 3 по курсу нанооптики, проведённом 16.10.2023, абсолютная успеваемость студентов составила 100 %, что соответствует оптимальному уровню абсолютной успеваемости. На занятии 3 по курсу нанооптики, проведённом 16.10.2023, качественная успеваемость студентов составила 83.3 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. На занятии 3 по курсу нанооптики, проведённом 16.10.2023, степень обученности студентов составила 89.3 %, что соответствует оптимальному уровню степень обученности. На занятии 3 по курсу нанооптики, проведённом 16.10.2023, высший уровень требований составил 89.3 %, средний уровень требований составил 56 %, низший уровень требований составил 30.7 %. На занятии 3 по курсу нанооптики, проведённом 16.10.2023, среднее значение отметок по пятибалльной шкале равно 4.667. На занятии 3 по курсу нанооптики, проведённом 16.10.2023, экспериментальное значение суммы хи-квадрат равно 15.667, что больше критического значения для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01, равного 15.086, поэтому первая гипотеза отвергается. Методика проведения занятия 3 требует дальнейшего совершенствования.

Занятие 4 по курсу нанооптики проведено 23.10.2023 по теме, связанной с изучением приближения эффективной среды для нанокompозитных сред с квантовыми точками, описываемых формулами Лорентц-Лоренца и Клаузиуса-Моссотти. Согласно рейтинговой системы оценивания максимальное количество баллов на занятии 4 составляет 13 баллов. Студент ФМ-19-02 на занятии 4 по курсу нанооптики заработал 13 баллов, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-04 на занятии 4 по курсу нанооптики заработал 8 баллов, что соответствует отметке «удовлетворительно». Студент ФМ-19-11 на занятии 4 по курсу нанооптики заработал 7 баллов, что соответствует отметке «удовлетворительно». Студент ФМ-19-20 на занятии 4 по курсу нанооптики заработал 13 баллов, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-24 на занятии 4 по курсу нанооптики заработал 7 баллов, что соответствует отметке «удовлетворительно». Студент ФМ-19-23 на занятии 4 по курсу нанооптики заработал 13 баллов, что соответствует отметке «отлично». По результатам проведения занятия 4 по нанооптике студенты первой подгруппы академической группы ФМ-19 получили 3 отметки «отлично», 3 отметки «удовлетворительно». На занятии 4 по курсу нанооптики, проведённом 23.10.2023, абсолютная успеваемость студентов составила 100 %, что соответствует оптимальному уровню абсолютной успеваемости. На занятии 4 по курсу нанооптики, проведённом 23.10.2023, качественная успеваемость студентов составила 58 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости.

что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. На занятии 4 по курсу нанооптики, проведённом 23.10.2023, степень обученности студентов составила 68 %, что соответствует оптимальному уровню степень обученности. На занятии 4 по курсу нанооптики, проведённом 23.10.2023, высший уровень требований составил 68 %, средний уровень требований составил 40 %, низший уровень требований составил 20 %. На занятии 4 по курсу нанооптики, проведённом 23.10.2023, среднее значение отметок по пятибалльной шкале равно 4.0. На занятии 4 по курсу нанооптики, проведённом 23.10.2023, экспериментальное значение суммы хи-квадрат равно 9.0, что меньше критического значения для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01, равного 15.086, поэтому первая гипотеза выполняется.

Контрольная работа по курсу нанооптики была проведена 10.01.2024. Согласно рейтинговой системы оценивания максимальное количество баллов на контрольной работе составляет 32 балла. Студент ФМ-19-02 на контрольной работе по курсу нанооптики набрал 32 балла, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-04 на контрольной работе по курсу нанооптики набрал 32 балла, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-11 на контрольной работе по курсу нанооптики набрал 17 баллов, что соответствует отметке «удовлетворительно». Студент ФМ-19-20 на контрольной работе по курсу нанооптики набрал 32 балла, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-24 на контрольной работе по курсу нанооптики набрал 17 баллов, что соответствует отметке «удовлетворительно». Студент ФМ-19-23 на контрольной работе по курсу нанооптики набрал 17 баллов, что соответствует отметке «удовлетворительно». По результатам проведения контрольной работы по нанооптике студенты первой подгруппы академической группы ФМ-19 получили 3 отметки «отлично», 3 отметки «удовлетворительно». На контрольной работе по курсу нанооптики, проведённой 10.01.2024, абсолютная успеваемость студентов составила 100 %, что соответствует оптимальному уровню абсолютной успеваемости. На контрольной работе по курсу нанооптики, проведённой 10.01.2024, качественная успеваемость студентов составила 50 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. На контрольной работе по курсу нанооптики, проведённой 10.01.2024, степень обученности студентов составила 68 %, что соответствует оптимальному уровню степень обученности. На контрольной работе по курсу нанооптики, проведённой 10.01.2024, высший уровень требований составил 68 %, средний уровень требований составил 40 %, низший уровень требований составил 20 %. На контрольной работе по курсу нанооптики, проведённой 10.01.2024, среднее значение отметок по пятибалльной шкале равно 4.0. На контрольной работе по курсу нанооптики, проведённой 10.01.2024, экспериментальное значение суммы хи-квадрат равно 9.0, что меньше критического значения для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01, равного 15.086, поэтому первая гипотеза выполняется.

Зачёт по курсу нанооптики был проведён 22.01.2024. Согласно рейтинговой системы оценивания максимальное количество баллов на зачёте составляет 32 балла. Студент ФМ-19-02 на зачёте по курсу нанооптики набрал 32 балла, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-04 на зачёте по курсу нанооптики набрал 32 балла, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-11 на зачёте по курсу нанооптики набрал 17 баллов, что соответствует отметке «удовлетворительно». Студент ФМ-19-20 на зачёте по курсу нанооптики набрал 32 балла, что соответствует отметке «отлично». Студент ФМ-19-24 на зачёте по курсу нанооптики набрал 17 баллов, что соответствует отметке «удовлетворительно». Студент ФМ-19-23 на зачёте по курсу нанооптики набрал 17 баллов, что соответствует отметке «удовлетворительно». По результатам проведения зачёта по нанооптике студенты первой подгруппы академической группы ФМ-19 получили 3 отметки «отлично», 3 отметки «удовлетворительно». На зачёте по курсу нанооптики, проведённом 22.01.2024, абсолютная успеваемость студентов составила 100 %,

что соответствует оптимальному уровню абсолютной успеваемости. На зачёте по курсу нанооптики, проведённом 22.01.2024, качественная успеваемость студентов составила 50 %, что соответствует оптимальному уровню качественной успеваемости. На зачёте по курсу нанооптики, проведённом 22.01.2024, степень обученности студентов составила 68 %, что соответствует оптимальному уровню степени обученности. На зачёте по курсу нанооптики, проведённой 22.01.2024, высший уровень требований составил 68 %, средний уровень требований составил 40 %, низший уровень требований составил 20 %. На зачёте по курсу нанооптики, проведённом 22.01.2024, среднее значение отметок по пятибалльной шкале равно 4.0. На зачёте по курсу нанооптики, проведённом 2.01.2024, экспериментальное значение суммы хи-квадрат равно 9.0, что меньше критического значения для 5 степеней свободы и уровня значимости 0.01, равного 15.086, поэтому первая гипотеза выполняется.

Анализ проведенного исследования показал, что внедрение методики преподавания курса нанооптики в педагогическом университете привело к улучшению усвоения материала студентами на практических занятиях по нанооптике. Студенты проявили более высокий уровень интереса к изучаемой теме, стали активнее участвовать в обсуждении результатов и дискуссиях на практических занятиях по нанооптике.

Заключение

Выводы исследования состоят в том, что предложенный подход к преподаванию курса нанооптики является актуальным и перспективным, разработанная методика преподавания курса нанооптики показала свою эффективность и может быть рекомендована для использования в педагогических университетах. Исследование показало, что разработка и внедрение новой методики преподавания курса нанооптики в педагогическом университете способствует более эффективному обучению студентов и подготовке квалифицированных специалистов.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что если применять разработанную методику преподавания курса нанооптики, то можно повысить качество обучения студентов, развить их профессиональные компетенции и подготовить высококвалифицированных специалистов в области нанотехнологий, подтверждена полностью.

Полученные результаты позволяют говорить о необходимости дальнейшего развития образовательных программ по педагогическому образованию с профилем по физике, учитывающих современные требования рынка труда и научно-технического прогресса в области нанотехнологий. Таким образом, улучшение методики преподавания курса нанооптики способствует развитию образования и науки, обеспечивает подготовку специалистов, способных эффективно работать в современном информационном обществе.

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. A multiphysics nanorobotic manipulation system / Wenqi Zhang [et al.] // 2022 12th International conference on CYBER technology in automation, control, and intelligent systems (CYBER). — IEEE, 2022. — jul. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/cyber55403.2022.9907536>.
3. Pundt Astrid. Nanoskalige Metall-Wasserstoff-Systeme : Ph.D. thesis / Astrid Pundt ; University Goettingen Repository. — 2022. — URL: <http://dx.doi.org/10.53846/goediss-2742>.

4. Role of physics and new insights in development of energy system through nanotechnology / Muhammad Mubashar Hanif [et al.] // Saudi Journal of Engineering and Technology. — 2022. — feb. — Vol. 7, no. 2. — P. 94–98. — URL: <http://dx.doi.org/10.36348/sjet.2022.v07i02.005>.
5. Roccapiore Kevin M., Kalinin Sergei V., Ziatdinov Maxim. Physics discovery in nanoplasmonic systems via autonomous experiments in scanning transmission electron microscopy // Advanced Science. — 2022. — nov. — Vol. 9, no. 36. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/advs.202203422>.
6. An Sangmin. Research work in the microscope-based nanoscale physics lab // Impact. — 2022. — jun. — Vol. 2022, no. 3. — P. 18–20. — URL: <http://dx.doi.org/10.21820/23987073.2022.3.18>.
7. Cesaria Maura, Di Bartolo Baldassare. Nanomaterials: basic concepts and quantum models // Nano-optics: principles enabling basic research and applications. — Springer Netherlands, 2017. — P. 43–105. — ISBN: 9789402408508. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-024-0850-8_3.
8. Korol Andrei V., Solov'yov Andrey V. Dynamics of systems on the nanoscale // The European Physical Journal D. — 2017. — dec. — Vol. 71, no. 12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1140/EPJD/E2017-80698-Y>.
9. Hoppensteadt Frank. A new spin on nanoscale computing // Nature. — 2017. — jul. — Vol. 547, no. 7664. — P. 407–408. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/547407A>.
10. Demming Anna. Physical behaviour at the nanoscale: a model for fertile research // Nanotechnology. — 2013. — may. — Vol. 24, no. 25. — P. 250201–250201. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/24/25/250201>.
11. Tan Seng Ghee, Jalil Mansoor B.A. Physics mathematics for nanoscale systems // Introduction to the physics of nanoelectronics. — Elsevier, 2012. — P. 1–22. — ISBN: 9780857095114. — URL: <http://dx.doi.org/10.1533/9780857095886.1>.
12. Ramezani Zeinab, Ahmadvand Arash. Fundamental phenomena in nanoscale semiconductor devices // Sub-micron semiconductor devices. — CRC Press, 2022. — mar. — P. 1–22. — ISBN: 9781003126393. — URL: <http://dx.doi.org/10.1201/9781003126393-1>.
13. Nanoscale photonic devices in the context of μ wave photonics and quantum information / Sylvain Combrie [et al.] // Integrated optics: devices, materials, and Technologies XXVI / Ed. by Sonia M. Garcia-Blanco, Pavel Cheben. — SPIE, 2022. — mar. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2615648>.
14. Confinement of skyrmions in nanoscale FeGe device-like structures / Alison C. Twitchett-Harrison [et al.] // ACS Applied electronic materials. — 2022. — sep. — Vol. 4, no. 9. — P. 4427–4437. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/acsaelm.2c00692>.
15. Balestra Francis. Nanoscale devices for the end of the roadmap // 2019 IEEE 13th International conference on ASIC (ASICON). — IEEE, 2019. — oct. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ASICON47005.2019.8983541>.

16. Merces Leandro, de Oliveira Rafael Furlan, Bof Bufon Carlos Cesar. Nanoscale variable-area electronic devices: contact mechanics and hypersensitive pressure application // ACS Applied materials and interfaces. — 2018. — oct. — Vol. 10, no. 45. — P. 39168–39176. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/ACSAMI.8B12212>.
17. Nanoscale device modeling using a conserving analytic continuation technique / H. Mera [et al.] // Physical Review B. — 2013. — aug. — Vol. 88, no. 7. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVB.88.075147>.
18. Borovik A., Kuleshov A., Trung Tran Tuan. Verification of device model parameters for nanoscale MOSFETs // 2015 International conference on advanced technologies for communications (ATC). — IEEE, 2015. — oct. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ATC.2015.7388382>.

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

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

E-mail: ksorokina2001@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-5623-4346

Web of Science ResearcherID  AAX-8219-2021

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

Investigation on teaching methods for a nanooptics course at a pedagogical university

K. K. Altunin , E. S. Sorokina 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted April 22, 2024

Resubmitted April 24, 2024

Published June 12, 2024

Abstract. The results of a pedagogical experiment to test the methodology for teaching a nano-optics course, including the use of modern information technologies, in the physics and mathematics majors of the pedagogical direction of training at a pedagogical university are presented. As a result of the conducted pedagogical experiment, positive results were obtained from testing the methodology for teaching a nanooptics course at a pedagogical university.

Keywords: nanooptics, nanooptics course, pedagogical experiment, testing of teaching methods, pedagogical university

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. A multiphysics nanorobotic manipulation system / Wenqi Zhang [et al.] // 2022 12th International conference on CYBER technology in automation, control, and intelligent systems (CYBER). — IEEE, 2022. — jul. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/cyber55403.2022.9907536>.
3. Pundt Astrid. Nanoskalige Metall-Wasserstoff-Systeme : Ph.D. thesis / Astrid Pundt ; University Goettingen Repository. — 2022. — URL: <http://dx.doi.org/10.53846/goediss-2742>.
4. Role of physics and new insights in development of energy system through nanotechnology / Muhammad Mubashar Hanif [et al.] // Saudi Journal of Engineering and Technology. — 2022. — feb. — Vol. 7, no. 2. — P. 94–98. — URL: <http://dx.doi.org/10.36348/sjet.2022.v07i02.005>.
5. Roccapriore Kevin M., Kalinin Sergei V., Ziatdinov Maxim. Physics discovery in nanoplasmonic systems via autonomous experiments in scanning transmission electron microscopy // Advanced Science. — 2022. — nov. — Vol. 9, no. 36. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/advs.202203422>.

6. An Sangmin. Research work in the microscope-based nanoscale physics lab // Impact. — 2022. — jun. — Vol. 2022, no. 3. — P. 18–20. — URL: <http://dx.doi.org/10.21820/23987073.2022.3.18>.
7. Cesaria Maura, Di Bartolo Baldassare. Nanomaterials: basic concepts and quantum models // Nano-optics: principles enabling basic research and applications. — Springer Netherlands, 2017. — P. 43–105. — ISBN: 9789402408508. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-024-0850-8_3.
8. Korol Andrei V., Solov'yov Andrey V. Dynamics of systems on the nanoscale // The European Physical Journal D. — 2017. — dec. — Vol. 71, no. 12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1140/EPJD/E2017-80698-Y>.
9. Hoppensteadt Frank. A new spin on nanoscale computing // Nature. — 2017. — jul. — Vol. 547, no. 7664. — P. 407–408. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/547407A>.
10. Demming Anna. Physical behaviour at the nanoscale: a model for fertile research // Nanotechnology. — 2013. — may. — Vol. 24, no. 25. — P. 250201–250201. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/24/25/250201>.
11. Tan Seng Ghee, Jalil Mansoor B.A. Physics mathematics for nanoscale systems // Introduction to the physics of nanoelectronics. — Elsevier, 2012. — P. 1–22. — ISBN: 9780857095114. — URL: <http://dx.doi.org/10.1533/9780857095886.1>.
12. Ramezani Zeinab, Ahmadvand Arash. Fundamental phenomena in nanoscale semiconductor devices // Sub-micron semiconductor devices. — CRC Press, 2022. — mar. — P. 1–22. — ISBN: 9781003126393. — URL: <http://dx.doi.org/10.1201/9781003126393-1>.
13. Nanoscale photonic devices in the context of μ wave photonics and quantum information / Sylvain Combrie [et al.] // Integrated optics: devices, materials, and Technologies XXVI / Ed. by Sonia M. Garcia-Blanco, Pavel Cheben. — SPIE, 2022. — mar. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2615648>.
14. Confinement of skyrmions in nanoscale FeGe device-like structures / Alison C. Twitchett-Harrison [et al.] // ACS Applied electronic materials. — 2022. — sep. — Vol. 4, no. 9. — P. 4427–4437. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/acsaelm.2c00692>.
15. Balestra Francis. Nanoscale devices for the end of the roadmap // 2019 IEEE 13th International conference on ASIC (ASICON). — IEEE, 2019. — oct. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ASICON47005.2019.8983541>.
16. Merces Leandro, de Oliveira Rafael Furlan, Bof Bufon Carlos Cesar. Nanoscale variable-area electronic devices: contact mechanics and hypersensitive pressure application // ACS Applied materials and interfaces. — 2018. — oct. — Vol. 10, no. 45. — P. 39168–39176. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/ACSAMI.8B12212>.
17. Nanoscale device modeling using a conserving analytic continuation technique / H. Mera [et al.] // Physical Review B. — 2013. — aug. — Vol. 88, no. 7. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVB.88.075147>.

18. Borovik A., Kuleshov A., Trung Tran Tuan. Verification of device model parameters for nanoscale MOSFETs // 2015 International conference on advanced technologies for communications (ATC). — IEEE, 2015. — oct. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ATC.2015.7388382>.

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

Ekaterina Sergeevna Sorokina — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technology Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: ksorokina2001@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-5623-4346

Web of Science ResearcherID  AAX-8219-2021

Научная статья
УДК 372.853
ББК 74.489
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.-d
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Разработка дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике

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 14 мая 2024 года

После переработки 17 мая 2024 года

Опубликована 12 июня 2024 года

Аннотация. Представлены результаты разработки дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике в системе управления обучением MOODLE. Общая трудоёмкость дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике составляет две зачётные единицы. Описаны тематические модули курса по методам искусственного интеллекта в физике. Представлено описание элементов в виде лекций, семинаров, заданий, тестов в каждом тематическом модуле курса по методам искусственного интеллекта в физике в системе управления обучением MOODLE.

Ключевые слова: курс, дистанционный курс, элемент курса, лекция, семинар, тест, искусственный интеллект, интеллектуальная система, методы искусственного интеллекта, методы машинного обучения, физика

Введение

Искусственный интеллект — свойство интеллектуальных систем выполнять творческие функции, которые традиционно считаются прерогативой человека. Технологии искусственного интеллекта направлены на создание интеллектуальных машин и интеллектуальных компьютерных программ.

Целью работы является исследование возможностей методов искусственного интеллекта для решения физических задач в контексте курса по методам искусственного интеллекта в физике. Задачи исследования состоят в том, чтобы написать обзор научной литературы по существующим методам искусственного интеллекта и их применимости для решения физических задач, разработать структуру и элементы дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике в системе управления обучением MOODLE.

¹E-mail: sokolovavasilevna2002@inbox.ru

Объектом исследования является курс по методам искусственного интеллекта в физике. Предметом исследования является процесс разработки дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике в системе управления обучением MOODLE.

Для решения поставленных задач будут использоваться методы анализа научных и научно-методических источников по описанию существующих методов искусственного интеллекта, методы разработки дистанционных курсов по искусственному интеллекту на основе методов машинного обучения и глубокого обучения в физике, тестирование дистанционного курса по искусственному интеллекту в физике. В качестве материалов исследования будут использованы научные источники по методам искусственного интеллекта в физике, открытые данные о результатах тестирования дистанционного курса по искусственному интеллекту в физике.

Научная новизна исследования состоит в анализе новых алгоритмов искусственного интеллекта, предназначенных для решения физических задач различной сложности, анализе алгоритмов искусственного интеллекта и методов машинного обучения для описания состояний физических систем в контексте курса по методам искусственного интеллекта в физике.

Гипотеза исследования состоит в том, что если разработать элементы дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в области физики, то это может способствовать улучшению качества преподавания курса за счёт более динамического и оперативного контроля знаний и выдачи заданий в составе дистанционного курса средствами системы управления обучением MOODLE.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что результаты исследования позволят расширить понимание возможностей искусственного интеллекта и его применения в области физики, а также разработать новые алгоритмы и методы для решения сложных физических задач по моделированию физических процессов. Практическая значимость исследования состоит в том, что разработанные алгоритмы искусственного интеллекта могут быть использованы для решения прикладных задач в области классической и квантовой физики и для создания новых технологий и устройств на их основе.

Обзор научных работ по искусственному интеллекту в физике

Искусственный интеллект связан с задачей использования компьютеров для понимания человеческого интеллекта, но не обязательно ограничивается биологически правдоподобными методами. В настоящее время существующие интеллектуальные системы имеют очень узкие области применения. Например, программы, способные обыграть человека в шахматы, не могут отвечать на вопросы.

Существует множество приложений искусственного интеллекта, каждое из которых образует почти самостоятельное направление. В качестве примеров можно привести программирование интеллекта в компьютерных играх, нелинейное управление, интеллектуальные системы информационной безопасности. Но в искусственном интеллекте взаимосвязь между, казалось бы, различными направлениями выражена особенно сильно, и это связано с философским спором о сильном и слабом искусственном интеллекте.

Искусственный интеллект — это область компьютерных наук, которая занимается созданием интеллектуальных систем, способных выполнять задачи, требующие человеческого интеллекта. Искусственный интеллект всё чаще используется в физике для различных приложений. Нейронные сети, основанные на физике, разрабатываются для решения дифференциальных уравнений путём включения физических знаний в процесс обучения [1]. Нейронные сети, основанные на физике, объединяют искусственный интеллект с физикой для решения сложных задач с ограниченными данными, улуч-

шая прогнозы за счёт включения физических знаний в обучение нейронных сетей. В статье [1] нейронные сети с учётом физики предлагаются для аппроксимации любого дифференциального уравнения путём решения задачи минимизации в условиях обучения без учителя, изучая неизвестное поле, чтобы сохранить наложенные ограничения (границы и физические остатки). Искусственный интеллект играет решающую роль в ядерной медицине и молекулярной визуализации, помогая в таких задачах, как реконструкция изображений и визуализация. Никто не может отрицать значительное влияние искусственного интеллекта на повседневную жизнь, особенно в секторе здравоохранения, где он стал важнейшим и полезным инструментом в ядерной медицине и молекулярной визуализации. В статье [2] предоставлено краткое описание различных применений искусственного интеллекта в однофотонной эмиссионной компьютерной томографии и позитронно-эмиссионной томографии с анатомической информацией или без неё (компьютерная томография или магнитно-резонансная томография). В статье [2] анализируются подмножества искусственного интеллекта, такие как машинное обучение и глубокое обучение, а также подробно рассматриваются их применения в физике визуализации ядерной медицины, включая создание карт затухания, оценку рассеянных событий, глубину взаимодействия, время полета, изображение ядерной медицины. реконструкция (оптимизация алгоритма реконструкции) и визуализация с низкой дозой. В сейсмической физике нефти искусственный интеллект улучшает характеристики коллектора за счёт интеграции различных типов данных и точного прогнозирования свойств коллектора [3]. Искусственный интеллект используется при моделировании физики горных пород для построения диаграмм упругих свойств в плотных песчаных коллекторах, улучшения контроля разработки скважин посредством сейсмической инверсии и прогнозного моделирования. В статье [3] использование искусственного интеллекта и машинного обучения сделало процесс реконструкции каротажа намного проще, быстрее и экономичнее за счёт изучения бесчисленного опыта уже разведанных и разрабатываемых резервуаров, свойств их пород и поведения потока жидкости в поперечном пруду при различных обстоятельствах и, следовательно, прогнозирует соответственно. Физики используют искусственный интеллект для анализа данных, моделирования и анализа моделей, подчеркивая разнообразные применения искусственного интеллекта в этой области [4]. Искусственный интеллект в физике используется для анализа данных, моделирования и анализа моделей, расширяя исследования в таких областях, как термоядерный синтез, моделирование физических систем и расчёты атомной структуры материалов. В статье [4] систематизируются различные приложения, для которых физики искусственного интеллекта используют искусственный интеллект, грубо классифицируя их на анализ данных, моделирование и анализ моделей, а затем классифицируя их на три категории: данные, моделирование и анализ. Синергия между физикой и искусственным интеллектом имеет решающее значение для преодоления таких проблем, как противоречивые прогнозы и сложность вычислений, открывая путь к революционным достижениям в инженерных и физических науках [5]. В статье [5] обсуждается симбиоз физики и искусственного интеллекта для решения таких проблем, как сложность вычислений, что предлагает многообещающий путь для улучшения искусственного интеллекта и трансформации инженерных и физических наук. В статье [5] показано, что новый симбиоз физики и искусственного интеллекта может преодолеть такие огромные проблемы, тем самым не только расширяя впечатляющий рост искусственного интеллекта, но и меняя направление инженерных и физических наук. В последние годы правительства всего мира запустили исследовательские инициативы в области искусственного интеллекта. Они варьируются от Австралии, Канады и США до Китайской Народной Республики, Дании, Европейской комиссии, Франции, Германии и Великобритании. У каждого внезапно появляется стратегия «создания искусственного

интеллекта», какой бы частью планеты он ни был. В ближайшие десятилетия вполне вероятно, что в эту сферу потекут десятки миллиардов государственных и частных долларов, евро и юаней. Однако спросите физиков, что они думают об искусственном интеллекте, и они, вероятно, удивятся. Для них искусственный интеллект был модным в 1980-е годы. Они предпочитают называть это «машинным обучением» и гордятся тем, что используют этот термин на протяжении десятилетий. В статье [5] обобщаются различные приложения, для которых физики искусственного интеллекта используют искусственный интеллект, грубо классифицируя их на анализ данных, моделирование и анализ моделей.

В статье [6] обсуждается интеграция физических знаний в автономное фазовое картографирование с использованием искусственного интеллекта, демонстрируя важность научного искусственного интеллекта в ускорении открытия и оптимизации материалов в физике. В статье [6] рассматривается автономный алгоритм исследования и оптимизации материалов с обратной связью, использующий научный искусственный интеллект для решения двух задач: изучения взаимосвязи состава и структуры материальной системы и определения составов материалов с оптимальными функциональными свойствами.

Искусственный интеллект предлагается включить в программы магистратуры по медицинской физике, чтобы привести набор навыков в соответствие с развивающимся технологическим ландшафтом, влияя на такие задачи, как диагностика и планирование лечения [7]. Достижения в области искусственного интеллекта превратили его из незаменимого инструмента в исследованиях и разработках в основную технологию, которая фундаментально меняет то, как работают и живут люди, и пропагандируется включение искусственного интеллекта в учебную программу аспирантуры по медицинской физике, чтобы лучше адаптировать набор навыков работников [7]. Недавние достижения в области искусственного интеллекта превратили его из незаменимого инструмента в исследованиях и разработках в основную технологию, которая фундаментально меняет то, как мы работаем и живём. Искусственный интеллект уже включён в некоторые распространённые инструменты медицинской физики, используемые для поддержки ключевых задач, таких как диагностика, планирование лечения. В ближайшем будущем, вероятно, произойдёт смена парадигмы в клинической практике, в которой искусственный интеллект будет использоваться более широко. Поэтому некоторые выступают за включение искусственного интеллекта в учебную программу аспирантуры по медицинской физике, чтобы лучше адаптировать навыки работников к этой новой парадигме. Однако у других есть сомнения по поводу такой адаптации учебной программы.

Машинное обучение в физике подразумевает интеграцию алгоритмов машинного обучения с физическими ограничениями и математическими моделями для создания более эффективных и эффективных моделей. Машинное обучение с учётом физики сочетает машинное обучение с физическими законами, такими как сохранение энергии, для улучшения обобщаемости и точности модели [8, 9]. Машинное обучение с учётом физики применяется в различных областях, включая моделирование динамических систем, управление и прогнозирование химических свойств, где оно обеспечивает согласованность моделей с физическими принципами и расширяет их прогностические возможности [8, 10]. Машинное обучение, вдохновлённое физикой, в статье [10] сосредоточено на прогнозировании локализованных интенсивных свойств, таких как энергия молекул с использованием орбитально-взвешенных функций объединения для получения точных результатов. Включая физические законы в модели машинного обучения, машинное обучение с учётом физики может решать проблемы, связанные с нехваткой данных, плохой обобщаемостью и сдвигами предметных областей, что делает его многообещающим подходом для развития приложений искусственного интеллекта для

зондирования и решения сложных проблем в физике и других точных науках [9]. Нейронные сети, основанные на физике, объединяют машинное обучение с физическими принципами, позволяя эффективно моделировать перенос радиации в гетерогенных средах путём обучения остаточным уравнениям, как обсуждается в статье [11]. Машинное обучение на основе физики используется для определения эффективных термомеханических свойств композитов, демонстрации успеха в решении проблем термомеханических ячеек и определения соответствующих эффективных свойств [12]. В статье [12] система двухмасштабной периодической асимптотической гомогенизации первого порядка, опосредованная нейронной сетью, используется для вычислительного определения термоупругих свойств двухфазных композитов. Машинное обучение с учётом физики объединяет знания физики с машинным обучением, повышая эффективность данных и стабильность прогнозов, особенно в механике жидкости, предлагая потенциал для замены дорогостоящего численного моделирования [13]. В статье [13] представлена историческая перспектива нейронных сетей, а также исследуются существующие приложения машинного обучения с учётом физики для решения задач механики жидкости в сложных потоках с высокими числами Рейнольдса.

Результаты разработки дистанционного курса

Опишем этапы разработки структуры и элементов дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике. Первый этап разработки курса по методам искусственного интеллекта в физике состоит в определении цели, задач курса, компетенций и индикаторов курса. На первом этапе необходимо определить, какие знания и навыки студенты должны получить в результате изучения курса. Второй этап разработки курса по методам искусственного интеллекта в физике состоит в разработке модульной структуры курса. Необходимо разбить материал на модули, каждый из которых будет посвящен определённой теме. Третий этап разработки курса по методам искусственного интеллекта в физике состоит в создании теоретических материалов курса по методам искусственного интеллекта в физике. Необходимо написать лекции, которые будут содержать теоретический материал по каждой теме курса. Четвёртый этап разработки курса по методам искусственного интеллекта в физике состоит в разработке наглядных материалов курса. Нужно создать презентации, видео-уроки, интерактивные задания и другие наглядные материалы, которые помогут студентам лучше усвоить материал. Пятый этап разработки курса по методам искусственного интеллекта в физике состоит в разработке контрольно-измерительных материалов, включающих тесты, задачи, контрольные работы для оценки степени сформированности компетенций у студентов, изучающих курс. Шестой этап разработки курса по методам искусственного интеллекта в физике состоит в апробации курса по методам искусственного интеллекта в физике. Перед тем, как начать читать курс, необходимо провести апробацию, чтобы выявить возможные недочёты и исправить их. Седьмой этап разработки курса по методам искусственного интеллекта в физике состоит в корректировке элементов и содержания курса. После апробации курса необходимо внести изменения, если это необходимо. Восьмой этап разработки курса по методам искусственного интеллекта в физике состоит во внедрении курса в учебный процесс университета. После того, как курс был доработан, его можно начать преподавать студентам.

Целью дисциплины является формирование системы знаний и навыков, необходимых для анализа больших данных в физике. Задачи дисциплины включают в себя обзор основных методов и подходов к анализу больших данных при помощи искусственного интеллекта в физике, изучение методов анализа больших данных при помощи искусственного интеллекта в физике, разработка проекта по применению искусственного интеллекта в физике. В ходе изучения курса студенты изучат основные методы и под-

ходы к анализу больших данных, а также приобретут практический опыт работы с программным обеспечением для анализа больших данных в физике.

Методы искусственного интеллекта в физике

Личный кабинет / Мои курсы / Методы искусственного интеллекта в физике

Режим редактирования

Тема 1. Описательная статистика на основе дисперсионного и регрессионного анализа данных в физике

Форум: 1 Лекция: 1 Тест: 1 Семинар: 1 Гиперссылки: 2
Прогресс: 0 / 3

Тема 2. Инструменты анализа и визуализации больших данных в физике

Лекции: 2 Тест: 1 Семинар: 1 Задание: 1 Гиперссылки: 9
Прогресс: 0 / 5

Тема 3. Методы анализа и визуализации больших данных в физике

Лекция: 1 Тест: 1 Семинар: 1 Гиперссылка: 1
Прогресс: 0 / 3

Тема 4. Основы машинного обучения и искусственного интеллекта в физике

Лекции: 2 Тест: 1 Семинар: 1 Задание: 1 Гиперссылки: 8 Чат: 1
Прогресс: 0 / 6

Рис. 1. Тематическая структура курса по методам искусственного интеллекта в физике, разработанного в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 1 изображена тематическая структура курса по методам искусственного интеллекта в физике, разработанного в системе управления обучением MOODLE. Тематический план курса по методам искусственного интеллекта в физике включает в себя четыре темы. В первой теме курса по методам искусственного интеллекта в физике собраны элементы для изучения описательной статистики на основе дисперсионного и регрессионного анализа данных в физике. Во второй теме курса по методам искусственного интеллекта в физике собраны элементы для изучения инструментов анализа и визуализации больших данных при помощи искусственного интеллекта в физике. В третьей теме курса по методам искусственного интеллекта в физике собраны элементы

для изучения методов анализа и визуализации больших данных при помощи искусственного интеллекта в физике. В четвёртой теме курса по методам искусственного интеллекта в физике собраны элементы для изучения основ машинного обучения и искусственного интеллекта в физике. Дистанционный курс по методам искусственного интеллекта в физике содержит шесть лекций, четыре теста, два задания и четыре семинара.

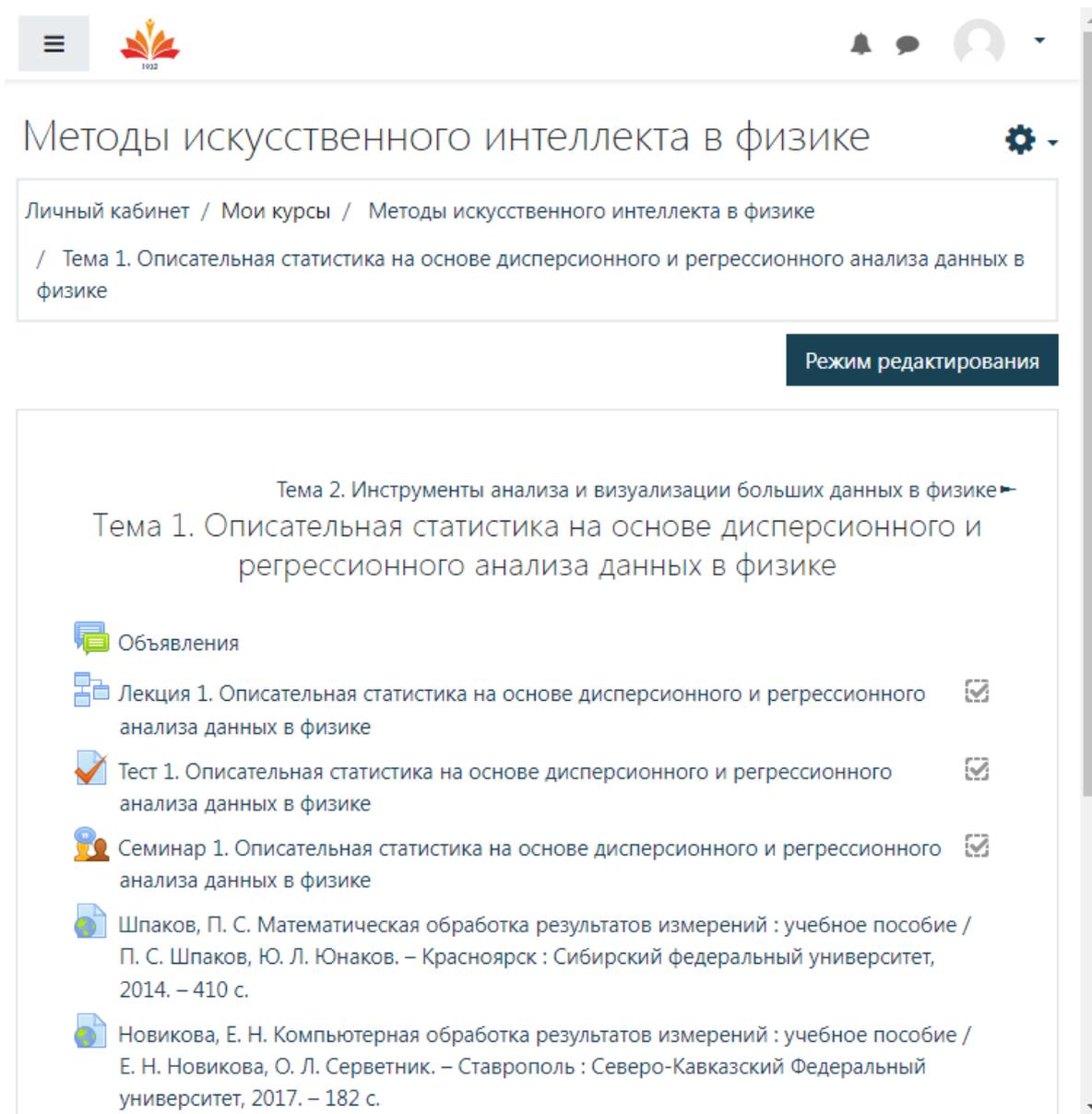


Рис. 2. Избранные элементы первой темы дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике, разработанного в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 изображена страница с избранными элементами первой темы дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике, разработанного в системе управления обучением MOODLE. Первая тема курса по методам искусственного интеллекта в физике посвящена изучению описательной статистики на основе дисперсионного и регрессионного анализа данных в физике. Вопросы первой темы курса по методам искусственного интеллекта в физике включают обзор основных понятий и терминов описательной статистики, обзор основных методов и подходов к анализу больших данных в описательной статистике, обзор программного обеспечения для анализа больших данных при помощи искусственного интеллекта в физике.

В составе первой темы курса по методам искусственного интеллекта в физике содержатся одна лекция, один тест и один семинар. Первая лекция посвящена изучению теории описательной статистики на основе дисперсионного и регрессионного анализа данных в физике. Максимальная оценка первой лекции составляет 1 балл. Первый тест предназначен для контроля знаний по описательной статистике на основе дисперсионного и регрессионного анализа данных в физике на репродуктивном уровне усвоения знаний. Максимальная отметка за первый тест составляет 13 баллов. Первый семинар предназначен для обсуждения вопросов по описательной статистике на основе дисперсионного и регрессионного анализа данных в физике. Максимальная отметка первого семинара составляет 13 баллов, а проходная отметка составляет 7 баллов.

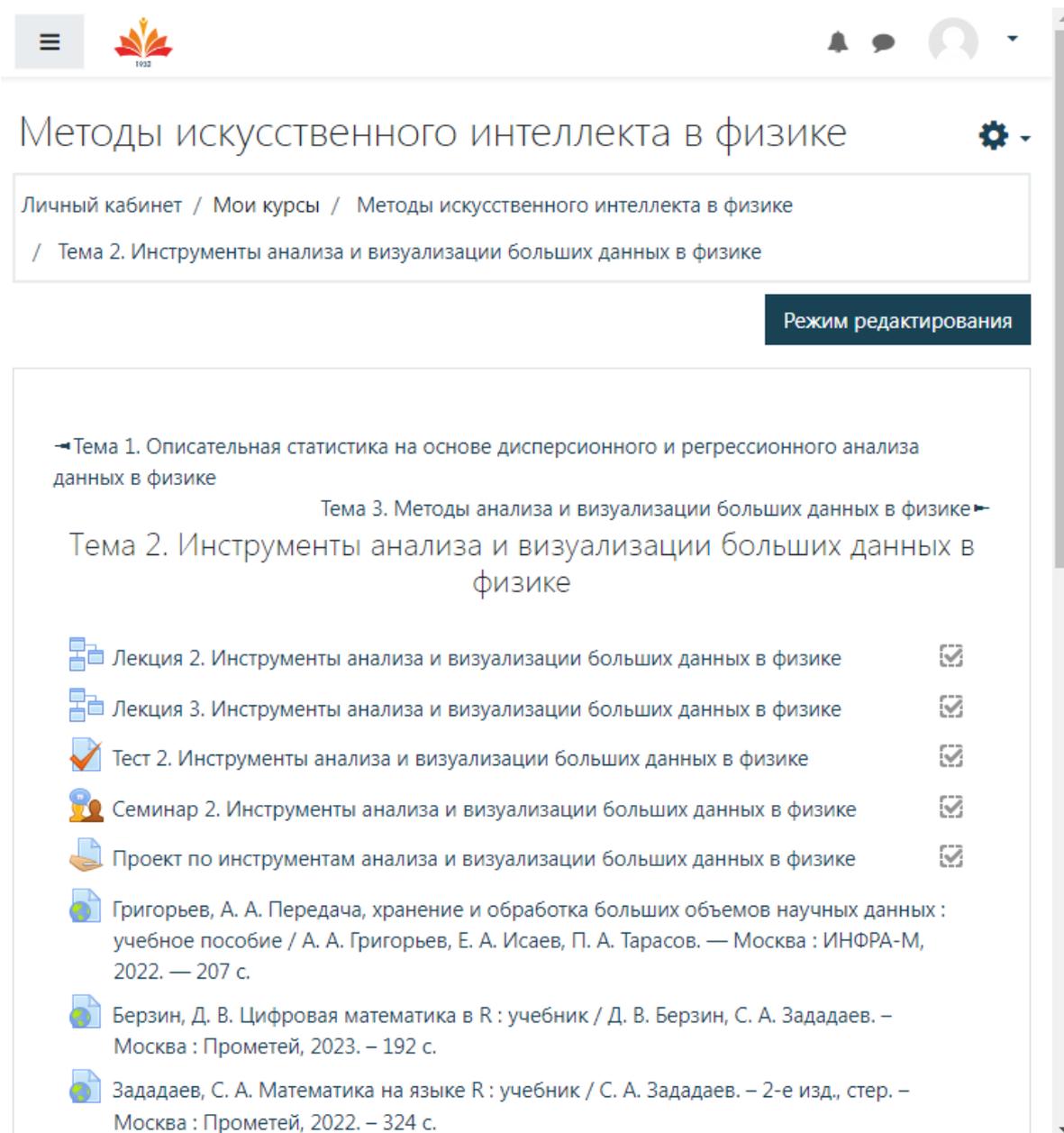


Рис. 3. Избранные элементы второй темы дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике, разработанного в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 изображена страница с избранными элементами второй темы дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике, разработанного в системе управления обучением MOODLE. Вторая тема курса по методам искусственного интел-

лекта в физике посвящена изучению инструментов анализа и визуализации больших данных при помощи искусственного интеллекта в физике. Вопросы второй темы курса по методам искусственного интеллекта в физике включают обзор популярных программных средств и программного обеспечения для анализа больших данных в физике, изучение основных функций программного обеспечения для анализа больших данных, практические занятия по работе с программным обеспечением анализа больших данных при помощи искусственного интеллекта в физике.

В составе второй темы курса по методам искусственного интеллекта в физике содержатся две лекции, один тест, одно задание и один семинар. Вторая лекция посвящена изучению теории инструментов анализа и визуализации больших данных в физике. Максимальная оценка второй лекции составляет 1 балл. Третья лекция посвящена изучению теории инструментов анализа и визуализации больших данных в физике. Максимальная оценка третьей лекции составляет 1 балл. Второй тест предназначен для контроля знаний по инструментам анализа и визуализации больших данных в физике на репродуктивном уровне усвоения знаний. Максимальная отметка за второй тест составляет 13 баллов. Первое задание представляет собой проект по инструментам анализа и визуализации больших данных в физике. Максимальная оценка первого задания составляет 13 баллов. Второй семинар предназначен для обсуждения вопросов по инструментам анализа и визуализации больших данных в физике. Максимальная отметка второго семинара составляет 13 баллов, а проходная отметка составляет 7 баллов.

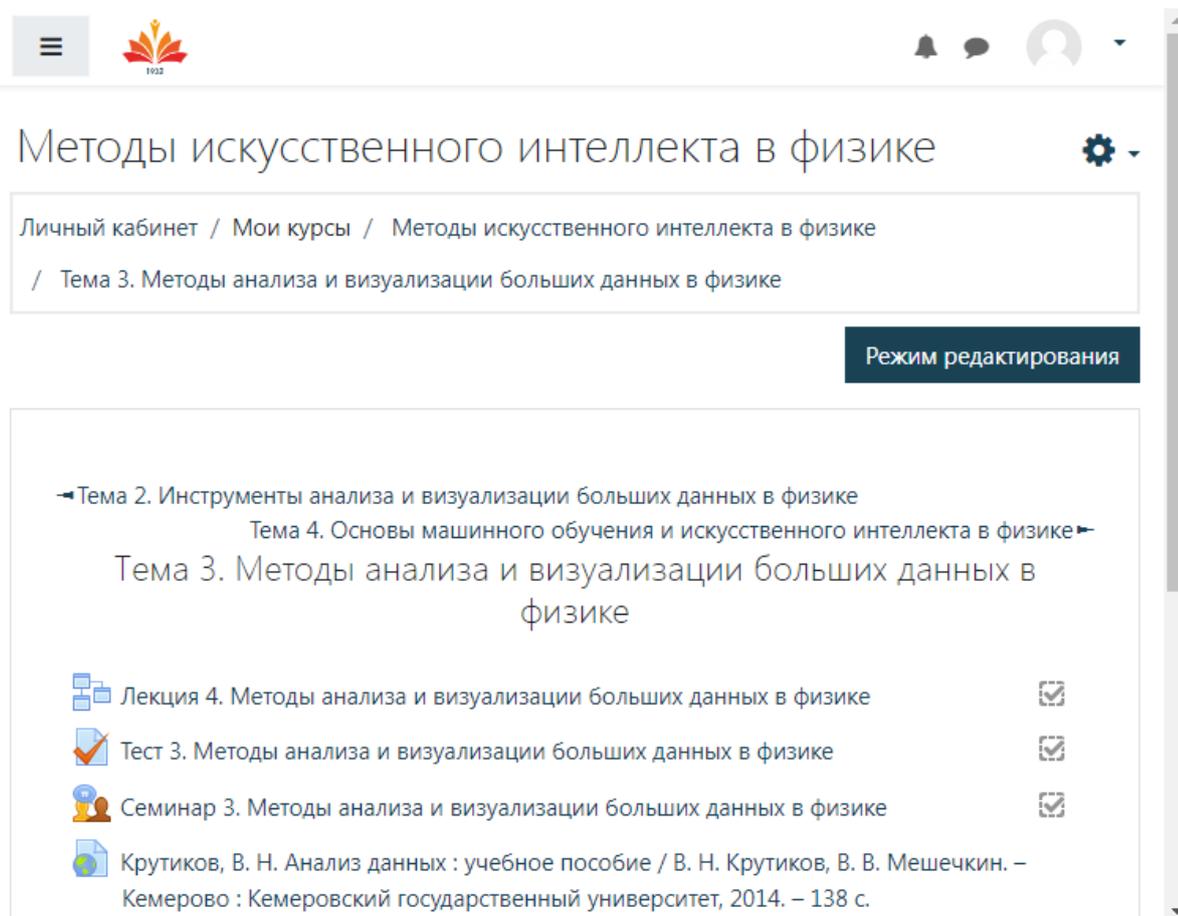


Рис. 4. Избранные элементы третьей темы дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике, разработанного в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 изображена страница с избранными элементами третьей темы дистанцион-

ного курса по методам искусственного интеллекта в физике, разработанного в системе управления обучением MOODLE. Третья тема курса по методам искусственного интеллекта в физике посвящена изучению методов анализа и визуализации больших данных при помощи искусственного интеллекта в физике. Вопросы третьей темы курса по методам искусственного интеллекта в физике включают обзор методов анализа больших данных в физике, изучение методов статистического анализа больших данных, изучение методов машинного обучения для анализа больших данных в физике, практические занятия по применению методов анализа больших данных в физике.

В составе третьей темы курса по методам искусственного интеллекта в физике содержатся одна лекция, один тест и один семинар. Четвёртая лекция посвящена изучению методов анализа и визуализации больших данных в физике. Максимальная оценка четвёртой лекции составляет 1 балл. Третий тест предназначен для контроля знаний по методам анализа и визуализации больших данных в физике на репродуктивном уровне усвоения знаний. Максимальная отметка за третий тест составляет 13 баллов. Третий семинар предназначен для обсуждения вопросов по методам анализа и визуализации больших данных в физике. Максимальная отметка третьего семинара составляет 13 баллов, а проходная отметка составляет 7 баллов.

На рис. 5 изображена страница с избранными элементами четвёртой темы дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике, разработанного в системе управления обучением MOODLE. Четвёртая тема курса по методам искусственного интеллекта в физике посвящена изучению основ машинного обучения и искусственного интеллекта в физике. Вопросы четвёртой темы курса по методам искусственного интеллекта в физике включают разработку проекта по анализу больших данных при помощи искусственного интеллекта в физике, презентацию проекта по анализу больших данных при помощи искусственного интеллекта в физике.

В составе четвёртой темы курса по методам искусственного интеллекта в физике содержатся две лекции, один тест, одно задание и один семинар. Пятая лекция посвящена изучению основ машинного обучения и искусственного интеллекта в физике. Максимальная оценка пятой лекции составляет 1 балл. Шестая лекция посвящена изучению основ машинного обучения и искусственного интеллекта в физике. Максимальная оценка шестой лекции составляет 1 балл. Четвёртый тест предназначен для контроля знаний по основам машинного обучения и искусственного интеллекта в физике на репродуктивном уровне усвоения знаний. Максимальная отметка за четвёртый тест составляет 13 баллов. Второе задание представляет собой контрольную работу по основам машинного обучения и искусственного интеллекта в физике. Максимальная оценка второго задания составляет 13 баллов. Четвёртый семинар предназначен для обсуждения вопросов по основам машинного обучения и искусственного интеллекта в физике. Максимальная отметка четвёртого семинара составляет 13 баллов, а проходная отметка составляет 7 баллов.

Требования к отметке по учебной дисциплине по методам искусственного интеллекта в физике основаны на том, что отметка будет основываться на успеваемости студентов по следующим критериям: успешное завершение практических занятий, успешное завершение проекта, успешная сдача зачёта.

Рассмотрим задачи, решаемые искусственным интеллектом. В последние годы искусственный интеллект всё шире применяется в различных областях науки, в том числе и в физике. Искусственный интеллект стал неотъемлемой частью нашей повседневной жизни, и его применение не ограничивается только сферой бизнеса и технологий. Исследования в области физики также активно используют возможности искусственного интеллекта для решения сложных задач и моделирования физических процессов. Анализ данных с помощью искусственного интеллекта позволяет учёным быстрее и эффек-

The screenshot shows a Moodle course interface. At the top, there is a navigation menu with a hamburger icon, a logo with the year 1932, and user profile icons. The main heading is 'Методы искусственного интеллекта в физике'. Below it, a breadcrumb trail reads: 'Личный кабинет / Мои курсы / Методы искусственного интеллекта в физике / Тема 4. Основы машинного обучения и искусственного интеллекта в физике'. A dark blue button labeled 'Режим редактирования' is visible. The main content area shows a list of course elements for 'Тема 4. Основы машинного обучения и искусственного интеллекта в физике':

- Лекция 5. Основы машинного обучения и искусственного интеллекта в физике
- Лекция 6. Основы машинного обучения и искусственного интеллекта в физике
- Тест 4. Основы машинного обучения и искусственного интеллекта в физике
- Семинар 4. Основы машинного обучения и искусственного интеллекта в физике
- Контрольная работа 1
- Осипов, Г. С. Методы искусственного интеллекта : монография / Г. С. Осипов. - Москва : Физматлит, 2011. - 296 с.
- Андрейчиков, А. В. Интеллектуальные информационные системы и методы искусственного интеллекта : учебник / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. — Москва : ИНФРА-М, 2024. — 530 с.
- Пенькова, Т. Г. Модели и методы искусственного интеллекта : учебное пособие / Т. Г. Пенькова, Ю. В. Вайнштейн. - Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019. - 116 с.

Рис. 5. Избранные элементы четвертой темы дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике, разработанного в системе управления обучением MOODLE.

тивнее обрабатывать большие объёмы данных, получаемых в результате физических экспериментов, и выявлять скрытые физические закономерности. Одним из примеров применения искусственного интеллекта в физике является анализ экспериментальных данных, полученных в физических экспериментах по столкновению высокоэнергетических частиц. Такие эксперименты могут генерировать огромные объёмы экспериментальных данных, которые традиционные методы анализа не могут обработать за разумное время. Искусственный интеллект, напротив, может быстро обрабатывать большие объёмы данных и выявлять скрытые закономерности. Другим примером является использование искусственного интеллекта в анализе данных, полученных в результате наблюдений за космосом. Телескопы, такие как «Хаббл» и «Джеймс Уэбб», могут генерировать огромные объёмы данных, которые традиционные методы анализа не могут обработать за разумное время. Искусственный интеллект, напротив, может быстро обрабатывать большие объёмы данных и выявлять скрытые закономерности. Одним из ключевых методов искусственного интеллекта, используемых в физике, является ма-

шинное обучение. Машинное обучение позволяет изучать закономерности в больших наборах данных и использовать полученные знания для предсказания поведения физических систем. Методы машинного обучения включают в себя различные алгоритмы, такие как линейная регрессия, деревья решений, нейронные сети и многие другие. В области теоретической физики машинное обучение используется для изучения сложных квантовых систем, таких как атомы и молекулы. Например, нейронные сети могут использоваться для моделирования поведения атомов и молекул, а также для предсказания свойств новых материалов. Также машинное обучение активно используется в астрофизике для анализа данных от космических телескопов и детекторов. Например, алгоритмы машинного обучения используются для определения характеристик звезд и галактик, а также для обнаружения экзопланет. Кроме того, искусственный интеллект может использоваться для моделирования физических явлений. Например, искусственный интеллект может моделировать поведение сложных систем, таких как погода или климат, с большей точностью и скоростью, чем традиционные методы. В целом, анализ данных с помощью искусственного интеллекта имеет огромный потенциал в физике. Искусственный интеллект может помочь учёным быстрее и эффективнее обрабатывать большие объёмы данных, выявлять скрытые закономерности и моделировать сложные системы. Однако, необходимо помнить, что искусственный интеллект не является панацеей и должен использоваться с осторожностью и подкрепляться традиционными методами анализа.

К первой группе задач, решаемых при помощи искусственного интеллекта, относятся задачи анализа экспериментальных данных физических экспериментов строится с использованием алгоритмов машинного обучения, поскольку искусственный интеллект может анализировать огромные объёмы экспериментальных данных физических экспериментов, что позволяет выделять сигналы от шумов и давать более точные интерпретации результатов физических экспериментов. Ко второй группе задач, решаемых при помощи искусственного интеллекта, относятся задачи моделирования физических процессов и явлений, основанная на том, что искусственный интеллект предоставляет возможность более эффективного и точного моделирования сложных физических систем. К третьей группе задач, решаемых при помощи искусственного интеллекта, относятся задачи прогнозирования результатов сложных физических экспериментов, основанная на том, что искусственный интеллект способен предсказывать результаты физических экспериментов.

К недостаткам применения искусственного интеллекта для анализа больших данных физических экспериментов можно отнести следующие недостатки: высокая стоимость, поскольку использование искусственного интеллекта для анализа данных физических экспериментов требует значительных инвестиций в оборудование, программное обеспечение и обучение персонала; сложность интерпретации результатов, заключающаяся в том, что искусственный интеллект может выдавать результаты, которые трудно интерпретировать и понять без дополнительных исследований; ограничения в машинном обучении заключаются в том, что искусственный интеллект не может обучаться самостоятельно, ему требуется большое количество обучающих данных, которые могут быть недоступны или дорогостоящими; возможность ошибок в результатах, полученных искусственным интеллектом, поскольку искусственный интеллект, как и любая другая система, может допускать ошибки, которые могут повлиять на результаты анализа данных; зависимость от качества данных, поскольку качество результатов анализа данных искусственным интеллектом зависит от качества и объёма исходных данных физических экспериментов. Искусственный интеллект, занимающийся физикой, может вывести законы воображаемых Вселенных. Адекватное понимание машиной физической реальности до сих пор остается слабым местом.

Заключение

Искусственный интеллект успешно применяется для решения задач в области теоретической и прикладной физики. Этот подход позволяет существенно сократить время и ресурсы, необходимые для проведения физических исследований. Использование методов машинного обучения и глубокого обучения позволило получить новые результаты в области моделирования физических систем, а также в предсказании и анализе физических процессов. Применение систем искусственного интеллекта позволяет существенно улучшить качество решения задач, связанных с моделированием физических процессов и систем. Методы машинного обучения и обработки данных могут быть эффективно использованы для анализа и прогнозирования физических явлений и процессов. Применение алгоритмов обработки данных и методов оптимизации позволяет улучшить эффективность искусственного интеллекта при решении сложных физических задач. Оптимизация алгоритмов машинного обучения позволяет повысить точность и быстроту действия решения сложных физических задач.

В заключении работы сформулируем следующие выводы:

1. проведённый анализ литературы показал актуальность создания дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике,
2. разработанная система элементов в виде лекций, тестов, заданий, семинаров в составе дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в физике позволяет контролировать знания и хранить результаты обучения по учебной дисциплине по методам искусственного интеллекта в физике,
3. разработанный дистанционный курс по методам искусственного интеллекта в физике готов к началу использования в учебном процессе в педагогическом университете.

Задачи работы решены полностью.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если разработать элементы дистанционного курса по методам искусственного интеллекта в области физики, то это может способствовать улучшению качества преподавания курса за счёт более динамического и оперативного контроля знаний и выдачи заданий в составе дистанционного курса средствами системы управления обучением MOODLE, подтверждена полностью.

Список использованных источников

1. Physics-informed neural networks for advanced modeling / Dario Coscia [et al.] // Journal of open source software. — 2023. — jul. — Vol. 8, no. 87. — P. 5352. — URL: <http://dx.doi.org/10.21105/joss.05352>.
2. Artificial intelligence in nuclear medicine physics and imaging / Konstantinos Papachristou [et al.] // Hellenic journal of nuclear medicine. — 2023. — apr. — Vol. 26, no. 1. — P. 57–65. — URL: <https://www.doi.org/10.1967/s002449912561>.
3. Bassoult L. A. Castellanos. Artificial intelligence inside of rock physics modelling, case of study in tight sand reservoir // Day 2 Thu, June 15, 2023. — 23LACP. — SPE, 2023. — jun. — URL: <http://dx.doi.org/10.2118/213142-ms>.
4. Hossenfelder Sabine. What can artificial intelligence do for physics? — 2023. — jun. — URL: <http://dx.doi.org/10.1787/724b14a6-en>.
5. Physics-AI symbiosis / Bahram Jalali [et al.] // Machine learning: science and technology. — 2022. — sep. — Vol. 3, no. 4. — P. 041001. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/2632-2153/ac9215>.

6. Physics in the machine: integrating physical knowledge in autonomous phase-mapping / A. Gilad Kusne [et al.] // *Frontiers in physics*. — 2022. — feb. — Vol. 10. — URL: <http://dx.doi.org/10.3389/fphy.2022.815863>.
7. Xing Lei, Goetsch Steven, Cai Jing. Artificial intelligence should be part of medical physics graduate program curriculum // *Medical physics*. — 2021. — apr. — Vol. 48, no. 4. — P. 1457–1460. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/MP.14587>.
8. Physics-informed machine learning for modeling and control of dynamical systems / Truong X. Nghiem [et al.] // *2023 American control conference*. — IEEE, 2023. — may. — URL: <http://dx.doi.org/10.23919/acc55779.2023.10155901>.
9. Tan Rui, Luo Wenjie. Physics-informed machine learning model generalization in AIoT: opportunities and challenges // *Proceedings of cyber-physical systems and Internet of Things Week 2023*. — CPS-IoT Week '23. — ACM, 2023. — may. — URL: <http://dx.doi.org/10.1145/3576914.3588751>.
10. Physics-inspired machine learning of localized intensive properties / Ke Chen [et al.] // *Chemical science*. — 2023. — Vol. 14, no. 18. — P. 4913–4922. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d3sc00841j>.
11. Huhn Quincy A., Tano Mauricio E., Ragusa Jean C. Physics-informed neural network with Fourier features for radiation transport in heterogeneous media // *Nuclear science and engineering*. — 2023. — apr. — Vol. 197, no. 9. — P. 2484–2497. — URL: <http://dx.doi.org/10.1080/00295639.2023.2184194>.
12. Soyarslan C. Physics-informed machine learning in the determination of effective thermomechanical properties // *Materials research proceedings*. — ESAFORM. — Materials Research Forum LLC, 2023. — apr. — URL: <http://dx.doi.org/10.21741/9781644902479-175>.
13. A review of physics-informed machine learning in fluid mechanics / Pushan Sharma [et al.] // *Energies*. — 2023. — feb. — Vol. 16, no. 5. — P. 2343. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/en16052343>.

Сведения об авторах:

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 01.40.-d
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Development of a distance course on artificial intelligence methods in physics

E. S. Zheleznikova , V. V. Sokolova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted May 14, 2024

Resubmitted May 17, 2024

Published June 12, 2024

Abstract. The results of the development of a distance course on artificial intelligence methods in physics in the learning management system MOODLE are presented. The total complexity of the distance course on artificial intelligence methods in physics is two credit units. Thematic modules of the course on artificial intelligence methods in physics are described. A description of the elements in the form of lectures, seminars, assignments, tests in each thematic module of the course on artificial intelligence methods in physics in the learning management system MOODLE is presented.

Keywords: course, distance learning course, course element, lecture, seminar, test, artificial intelligence, intelligent system, artificial intelligence methods, machine learning methods, physics

References

1. Physics-informed neural networks for advanced modeling / Dario Coscia [et al.] // Journal of open source software. — 2023. — jul. — Vol. 8, no. 87. — P. 5352. — URL: <http://dx.doi.org/10.21105/joss.05352>.
2. Artificial intelligence in nuclear medicine physics and imaging / Konstantinos Papachristou [et al.] // Hellenic journal of nuclear medicine. — 2023. — apr. — Vol. 26, no. 1. — P. 57–65. — URL: <https://www.doi.org/10.1967/s002449912561>.
3. Bassoult L. A. Castellanos. Artificial intelligence inside of rock physics modelling, case of study in tight sand reservoir // Day 2 Thu, June 15, 2023. — 23LACP. — SPE, 2023. — jun. — URL: <http://dx.doi.org/10.2118/213142-ms>.
4. Hossenfelder Sabine. What can artificial intelligence do for physics? — 2023. — jun. — URL: <http://dx.doi.org/10.1787/724b14a6-en>.
5. Physics-AI symbiosis / Bahram Jalali [et al.] // Machine learning: science and technology. — 2022. — sep. — Vol. 3, no. 4. — P. 041001. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/2632-2153/ac9215>.
6. Physics in the machine: integrating physical knowledge in autonomous phase-mapping / A. Gilad Kusne [et al.] // Frontiers in physics. — 2022. — feb. — Vol. 10. — URL: <http://dx.doi.org/10.3389/fphy.2022.815863>.

7. Xing Lei, Goetsch Steven, Cai Jing. Artificial intelligence should be part of medical physics graduate program curriculum // *Medical physics*. — 2021. — apr. — Vol. 48, no. 4. — P. 1457–1460. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/MP.14587>.
8. Physics-informed machine learning for modeling and control of dynamical systems / Truong X. Nghiem [et al.] // *2023 American control conference*. — IEEE, 2023. — may. — URL: <http://dx.doi.org/10.23919/acc55779.2023.10155901>.
9. Tan Rui, Luo Wenjie. Physics-informed machine learning model generalization in AIoT: opportunities and challenges // *Proceedings of cyber-physical systems and Internet of Things Week 2023*. — CPS-IoT Week '23. — ACM, 2023. — may. — URL: <http://dx.doi.org/10.1145/3576914.3588751>.
10. Physics-inspired machine learning of localized intensive properties / Ke Chen [et al.] // *Chemical science*. — 2023. — Vol. 14, no. 18. — P. 4913–4922. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d3sc00841j>.
11. Huhn Quincy A., Tano Mauricio E., Ragusa Jean C. Physics-informed neural network with Fourier features for radiation transport in heterogeneous media // *Nuclear science and engineering*. — 2023. — apr. — Vol. 197, no. 9. — P. 2484–2497. — URL: <http://dx.doi.org/10.1080/00295639.2023.2184194>.
12. Soyarslan C. Physics-informed machine learning in the determination of effective thermomechanical properties // *Materials research proceedings*. — ESAFORM. — Materials Research Forum LLC, 2023. — apr. — URL: <http://dx.doi.org/10.21741/9781644902479-175>.
13. A review of physics-informed machine learning in fluid mechanics / Pushan Sharma [et al.] // *Energies*. — 2023. — feb. — Vol. 16, no. 5. — P. 2343. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/en16052343>.

Information about authors:

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 372.853
ББК 74.489
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.-d
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Разработка электронного образовательного ресурса по теории магнитных явлений

О. Н. Захарова  ¹

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

Поступила в редакцию 25 марта 2024 года
После переработки 27 марта 2024 года
Опубликована 12 июня 2024 года

Аннотация. Представлены результаты разработки электронного образовательного ресурса по теории магнитных явлений.

Ключевые слова: магнетизм, теория магнитных явлений, курс физики, электронный образовательный ресурс, методика преподавания теории магнитных явлений

Введение

В современном образовательном процессе электронные образовательные ресурсы играют важную роль, помогая обучающимся усваивать новые знания и навыки. Одним из ключевых предметов в курсе физики является теория магнитных явлений, которая изучает взаимодействие магнитных полей и их влияние на различные магнитные материалы и объекты, проявляющие магнитные свойства. Актуальность исследования состоит в том, что исследование магнетизма является актуальным и важным направлением современной физики, поскольку магнитные поля играют ключевую роль в функционировании многих технических устройств и систем. Знания о свойствах магнитных полей и взаимодействии их с материалами необходимы для разработки новых технологий и совершенствования существующих технологий.

Целью работы является исследование влияния методик преподавания теории магнитных полей на формирование предметных результатов обучения в курсе физики.

Задачи исследования:

1. написать обзор научных работ по теоретическим основам магнетизма и теории магнитных полей,
2. разработать электронный образовательный ресурс по теории магнитных полей в различных магнитных материалах.

¹E-mail: zkhrvolly@gmail.com

Объектом исследования является магнитные явления.

Предметом исследования является система физических закономерностей магнитных полей в процессе формирования предметных результатов обучения физике в общеобразовательной школе.

В качестве методов исследования используются анализ литературных источников по теоретическим основам магнетизма и теории магнитных полей, синтез материалов для наполнения электронного образовательного ресурса по магнетизму. В качестве материалов исследования используются теоретические материалы из курса физики для разработки электронного образовательного ресурса по магнетизму.

Научная новизна исследования состоит в выявлении новых аспектов разработки электронного образовательного ресурса по магнетизму.

Гипотеза исследования состоит в том, что если магнитные поля действительно оказывают значительное влияние на физические свойства различных магнитных материалов, то это влияние может быть использовано для создания новых технических решений и совершенствования существующих технологий создания приборов и устройств на основе магнитных материалов.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что результаты исследования позволят расширить и углубить теоретические представления о магнетизме и его влиянии на свойства различных материалов. Полученные данные могут быть использованы для разработки новых методик математического моделирования магнитных полей и взаимодействия их с материалами. Практическая значимость исследования состоит в том, что полученные данные могут использоваться для разработки новых электронных образовательных ресурсов по магнетизму.

Обзор научных работ по электронным образовательным ресурсам по магнетизму

В современном образовательном процессе всё больше и больше внимания уделяется электронным образовательным ресурсам по физике, позволяющим не только улучшить процесс обучения физике, но и сделать его более интересным и доступным для обучающихся.

Электронный образовательный ресурс по магнетизму может значительно улучшить качество обучения. Такие ресурсы могут включать мультимедийные материалы, в которых теоретические концепции применяются к реальным сценариям, позволяя учащимся создавать простые устройства и связывать экспериментальную работу с теоретическими уроками [1, 2]. В статье [1] обсуждается новый инструмент электронного обучения магнетизму и магнитным материалам, что указывает на наличие электронного образовательного ресурса по магнетизму. В статье [1] предложен способ решения задачи: одномерный график двумерного пространства одной точки интереса. В статье [2] представлены мультимедийные материалы для обучения электромагнетизму, включая практические устройства и вопросы, позволяющие связать теорию с экспериментами, способствующие автономному обучению на университетских курсах. В статье [2] представлен сборник мультимедийных материалов для преподавания электромагнетизма на первых курсах университетских курсов, целью которых является применение теоретических концепций к реальным средам с целью содействия обучению студентов. В работе [2] представлен сборник мультимедийных материалов для преподавания электромагнетизма на первых курсах вузов. Эти материалы открытого доступа направлены на применение теоретических концепций в реальной среде, чтобы способствовать обучению студентов. Одна из возможностей заключается в том, что учащиеся создадут серию простых устройств с помощью предоставленных аудиовизуальных материалов и вопросов, которые связывают проделанную экспериментальную работу с тем, что они узнали

на теоретических уроках. Кроме того, мультимедийный формат создаваемых учебных материалов позволяет использовать его свойства доступности, оперативности и повсеместности для содействия автономному обучению учащихся. Кроме того, использование языков программирования высокого уровня для учебных материалов может упростить исходный код, позволяя студентам сосредоточиться на понимании физических явлений и экспериментировать с различными параметрами для улучшения результатов обучения [3]. Учебные материалы по электричеству и магнетизму с использованием MATLAB были разработаны для повышения эффективности обучения с упором на визуализацию электромагнитных явлений для облегчения понимания физических концепций [3]. Учебные материалы по электричеству и магнетизму с использованием MATLAB представлены для повышения эффективности обучения, а исходный код становится проще благодаря использованию языка программирования высокого уровня MATLAB [3].

В статье [4] рассматриваются мультимедийные материалы для обучения электричеству и магнетизму, уделяя особое внимание качественным ресурсам для высшего образования. В статье [4] подчеркиваются ценные дидактические особенности свободно доступных материалов по информационным технологиям. В статье [4] представлены результаты экспертной оценки мультимедийных материалов для преподавания и изучения электричества и магнетизма, подготовленных в рамках ежегодной деятельности, проводимой международной группой учёных, связанных с мультимедийной физикой в преподавании и обучении.

Интернет подстегнул наше воображение относительно того, как образование может быть радикально преобразовано и улучшено за счёт внедрения информационных и коммуникационных технологий, а использование моделирования быстро стало широко обсуждаемой темой. Подобные симуляции считаются значительным педагогическим нововведением, особенно в курсе электромагнетизма, где с помощью набора интерактивных симуляций можно конкретизировать некоторые эксперименты, недоступные в реальной жизни. Целью интерактивного моделирования является улучшение понимания студентом путём предоставления ему значимого понимания изучаемых понятий, явлений, концепций, законов и моделей. Разработка дидактических симуляций ограничена как технологическими решениями, теориями обучения, так и численными моделями, которые должны гарантировать минимальное время выполнения, лучшую стабильность и приемлемую точность. В статье [5] представлены результаты дидактического моделирования электромагнетизма с использованием метода, ориентированного на числовые элементы. Дидактические симуляции, основанные на элементно-ориентированной модели, предлагают электронные образовательные ресурсы по электромагнетизму, улучшающие понимание посредством интерактивного моделирования для эффективного преподавания концепций электромагнетизма. Предлагаемый элементно-ориентированный метод отвечает требованиям скорости, точности и обеспечивает лучшую динамическую и наглядную интерпретацию основных законов электромагнетизма. Более того, эти приложения доступны не только для традиционного обучения в классе, но и для новых обучающих платформ, предоставляемых цифровыми технологиями, такими как обучение через Интернет, электронное обучение и мобильное обучение.

В статье [6] обсуждается разработанный образовательный инструмент, основанный на методе конечных элементов для изучения электромагнетизма, с упором на электромагнетизм в электротехнике. Электромагнетизм является обязательной темой в программе бакалавриата и магистратуры по электротехнике. Образовательный инструмент, основанный на методе конечных элементов, который позволяет студентам технических специальностей визуализировать электромагнитные поля внутри электромагнитных систем и обеспечивает лучшее понимание конструкции и оптимизации различных электрических устройств [6].

Класс физики для первокурсников — это новый онлайн-видеоресурс для вводного курса физики, основанного на расчетах, с упором на электричество и магнетизм, который положительно влияет на концептуальное понимание учащихся и их способности решать проблемы. Новый онлайн-видеоресурс под названием «Класс физики для первокурсников» был разработан командой факультета физики и астрономии Техасского университета в дополнение к вводным курсам по физике, основанным на исчислении, как упомянуто в статье [7]. В статье [7] описывается развитие этого ресурса и сообщаются результаты первого семестра развертывания весной 2017 года по успеваемости студентов как на экзаменах по курсу, так и на краткой оценке электричества и магнетизма. Видеомодули получили высокий рейтинг одобрения ($> 85\%$) студентов по данным анонимных кликер-опросов, проводимых дважды в течение семестра во время лекций. Данные промежуточных экзаменов показывают, что учащиеся, которые использовали этот ресурс, имели тенденцию превосходить студентов, которые не использовали видеомодули урока физики для первокурсников. Распределение экзаменационных баллов показывает, что студенты с частичным пониманием предмета курса (лекции, декламации) получили пользу от просмотра видеомодулей. Студенты весенних семестров 2015–2017 годов показали практически одинаковый уровень концептуальных знаний по данным предварительного тестирования, проведенного с использованием краткой оценки электричества и магнетизма, где в качестве контрольной группы использовались весны 2015 и весны 2016 года. Нормализованные результаты были в среднем выше у тех студентов, которые использовали видеомодули для занятий по физике для первокурсников, чем у тех, кто этого не делал. В целом, видеомодули курса физики для первокурсников продемонстрировали положительное влияние на концептуальное понимание учащихся и их способность решать проблемы.

Пакет компьютерного обучения, представленный в статье [8], представляет собой электронный образовательный ресурс по магнитостатике, улучшающий обучение за счёт визуализации магнитных полей в режиме реального времени в контакторе двойной U -образной формы. В статье [8] представлен пакет компьютерного обучения, позволяющий визуализировать магнитостатическое поле внутри и вокруг магнитной цепи контактора двойной U -образной формы путём решения нелинейной задачи конечных элементов. Моделирование этого устройства осуществляется путём решения в реальном времени нелинейной задачи конечных элементов. Реализация этого метода значительно оптимизирована, чтобы обеспечить анимацию шаблонов полей в реальном времени в ответ на любое взаимодействие с пользователем. В статье [8] представлена оценка улучшений, внесённых этой методикой в возможности обучения студентов.

В статье [9] представлена коллекция избранных важных ссылок, посвящённых магнитным материалам и их взаимодействию с электромагнитными полями, включая ферриты, плазму (как атмосферную, так и лабораторную), магнитные композиты, магнитные диэлектрические жидкости, сегнетоэлектрические жидкие кристаллы. Работа [9] представляет собой сборник избранных важных ссылок, посвящённых магнитным материалам и их взаимодействию с электромагнитными полями. Основные темы: ферриты, плазма (как атмосферная, так и лабораторная), магнитные композиты, магнитные диэлектрические жидкости, сегнетоэлектрические жидкие кристаллы. В статью [9] также включены разделы, посвящённые общим магнитным материалам и явлениям.

В статье [10] описывается компьютерное моделирование магнетизма для студентов-физиков, которое служит электронным образовательным ресурсом по магнетизму посредством моделирования модели Изинга. В статье [10] описывают компьютерное моделирование модели магнетизма Изинга, предназначенное для использования в качестве лабораторного «эксперимента» для студентов. В описании подчеркиваются физические «измерения», которые можно получить в результате такого моделирования. Можно

изучить многие детали магнитного фазового перехода: изменение намагниченности с температурой и поведение термодинамических функций внутренней энергии, теплоёмкости, свободной энергии и энтропии. Можно применить магнитное поле, что приведёт к изучению гистерезиса и поведения доменов.

В статье [11] описываются общие электромагнитные явления, которые необходимо учитывать, а также оборудование, которое будет использоваться, прежде чем представить множество различных экспериментальных результатов, из которых можно напрямую получить механические свойства материалов, что является идеальным средством мониторинга здоровья любого человека. магнитная металлическая структура. Электромагнитные свойства являются интересным средством неразрушающего контроля механических свойств различных материалов в ферромагнитных и парамагнитных материалах. Эти свойства включают одноосные и многоосные напряженные состояния, а также пластичность и усталостные повреждения и могут быть измерены как в макроскопическом, так и в микроскопическом масштабе, в зависимости от того, какое измерительное оборудование будет использоваться. В статье [11] описываются общие электромагнитные явления, которые необходимо учитывать, а также оборудование, которое необходимо использовать, прежде чем представлять множество различных экспериментальных результатов, из которых могут быть непосредственно получены упомянутые выше механические свойства материалов, что является идеальным средством мониторинга состава любого магнитного металлического изделия.

В статье [12] выполнены расчёты энергетических характеристик для моонитридов переходных металлов и проведено сравнение результатов с существующими экспериментальными данными. Равновесные константы решётки определяются из расчётов полной энергии и результаты сравниваются с существующими экспериментальными данными.

В статье [13] предложен механизм Стонера и простое объяснение ферромагнитного UTe с помощью среднего поля для намагниченности в кубических соединениях U , Nr и Pu , а также квазидвумерных соединениях U . В случае кубических соединений обсуждается прямая связь между энергией связи элементов валентной зоны и магнитным моментом. Для ферромагнитного UTe предложен механизм, подобный Стонеру, и простое объяснение среднего поля.

В статье [14] рассмотрены современные возможности информационных технологий проектирования электронных образовательных ресурсов и определены принципы формирования электронного образовательного ресурса с учётом общих и дидактических закономерностей обучения.

Магнитное дипольное излучение от интенсивного параметрического рассеяния в различных изоляторах демонстрирует зависимость интенсивности и насыщения, предсказываемые простой классической теорией, но скорость роста зависит от молекулярной структуры. Магнитное излучение от интенсивного параметрического рассеяния в различных изоляторах демонстрирует зависимость интенсивности и насыщения, предсказываемые простой классической теорией, но скорости роста варьируются в зависимости от молекулярной структуры, как обсуждается в статье [15].

Электромагнетизм является важным аспектом физики в учебной программе средней школы Нигерии и считается одной из трудных тем для изучения учащимися [16]. Кажется, очень мало исследований о том, как сделать изучение электромагнетизма легким и приятным. Таким образом, это исследование определило влияние обучения электромагнетизму с использованием интерактивной стратегии обучения на результаты обучения студентов-физиков старших классов средней школы. Квазиэкспериментальное исследование в контрольной группе до и после тестирования было использовано с участием 125 учащихся старших классов средней школы II из трех случайно выбранных школ. В статье [16] были использованы нетронутые классы, и две экспериментальные группы

обучались с использованием стратегии обучения с интерактивным изобретением: ученики группы I работали индивидуально, ученики группы II работали в группах по пять человек, а контрольная группа обучалась традиционно. Для сбора данных для исследования использовались два исследовательских инструмента, а именно рабочие листы достижений по физике и руководство для проведения интервью в классе. Студенты экспериментальных групп продемонстрировали лучшее понимание концепций, чем студенты контрольной группы. В конце курса было проведено собеседование в классе, и все студенты в экспериментальных группах сообщили, что им понравилось изучать эти концепции, потому что у них была возможность для практических занятий, и они предпочли бы, чтобы концепции электромагнетизма преподавали с использованием учебных материалов, которые они использовали. могли манипулировать, наблюдая за тем, что происходит сами по себе. Учителям было рекомендовано использовать эту стратегию, в которой упор делался на практическую деятельность, чтобы облегчить изучение электромагнетизма [16].

Решение электромагнитных задач основано на сложных численных дифференциальных уравнениях, которые трудно понять. Поэтому крайне важно анализировать их шаг за шагом и визуализировать в компьютерной среде, даже путём разработки программы. Такой подход улучшает понимание предмета и облегчает дальнейшие исследования. В статье [17] электромагнитное явление исследуется в ферромагнитной структуре с использованием двумерного статически-эллиптического уравнения в частных производных Максвелла в разработанной программной среде. В статье [17] рассматриваются все аспекты, начиная от математической модели и аналитического решения и заканчивая фундаментальными рабочими параметрами и характеристиками, с упором на образовательные цели. Моделирование и разработка программного обеспечения были выполнены в удобной для пользователя форме, что позволило студентам применять различные численные методы для решения практических задач, сохраняя при этом контроль над всем процессом моделирования. В статье [17] ожидается, что благодаря этому исследованию переход от теории к практике станет более плавным и прямым. В статье [17] теоретический анализ был проведён с использованием программного обеспечения Mathematica, и для иллюстрации аналогии было представлено сравнение с моделированием магнитного метода конечных элементов на типичной магнитной структуре. Всесторонний анализ статически-эллиптического электромагнитного уравнения Максвелла, основанный на двумерном численном решении в конкретной области, был выполнен подробным и однозначным образом с использованием различных форм уравнения, граничных условий и ферромагнитных материалов, и все это в образовательных целях.

Используя электронные курсы и электронные образовательные ресурсы, студенты могут углубиться в сложности магнетизма и его применения в структурированной и интерактивной форме, способствуя более глубокому пониманию магнетизма как фундаментального физического явления.

Разработка модульной структуры и элементов электронного образовательного ресурса по теории магнитных явлений

Рассмотрим процесс разработки модульной структуры, теоретических и контрольно-измерительных материалов электронного образовательного ресурса, посвященного изучению магнитных явлений. Методы электронного обучения, включая электронные курсы на таких платформах, как MOODLE, предлагают теоретические объяснения, лабораторные эксперименты, вычислительные задачи и тесты, связанные с электромагнетизмом, обеспечивая комплексную среду обучения для студентов программ по электромагнетизму.

Цель электронного образовательного ресурса состоит в том, чтобы помочь студентам усвоить основные понятия и законы магнетизма, научиться применять их для решения практических задач и подготовиться к экзамену по физике. Исходя из этой цели, задачами электронного образовательного ресурса являются: объяснение основных понятий и физических законов магнетизма, предоставление примеров решения физических задач и упражнений по магнетизму, создание интерактивных заданий для закрепления полученных знаний, обеспечение доступа к дополнительным материалам и литературе.

Рассмотрим классификацию современных электронных образовательных ресурсов электромагнетизму. Во-первых, текстовые ресурсы, включающие в себя учебники, справочники, энциклопедии, хрестоматии и другие печатные издания. Во-вторых, графические ресурсы, включающие в себя иллюстрации, схемы, графики, диаграммы, фотографии и другие графические материалы. В-третьих, видеоресурсы, включающие в себя видеоуроки, лекции, демонстрации экспериментов, обучающие фильмы и другие видеоматериалы. В-четвёртых, мультимедийные ресурсы, сочетающие в себе текст, графику, видео-материалы, аудио-материалы и интерактивные элементы, причём это могут быть интерактивные учебники, виртуальные лаборатории, компьютерные модели. В-пятых, электронные ресурсы для контроля знаний, включающие в себя тестирующие программы, онлайн-тесты, задания для самоконтроля. В-шестых, электронные ресурсы для проектной деятельности, включающие в себя проекты, задачи, кейсы и другие материалы для организации проектной работы.

Первым этапом создания электронного образовательного ресурса по теории магнитных явлений является определение цели и задач электронного образовательного ресурса по магнетизму: в данном случае это обучение студентов теории магнитных явлений, их основным законам и принципам, а также развитие у них практических навыков решения задач в этой теории магнитных явлений. Вторым этапом создания электронного образовательного ресурса по теории магнитных явлений является создание структуры электронного образовательного ресурса: введение в теорию магнитных явлений, основные понятия и термины, законы и принципы, примеры решения задач, интерактивные задания для закрепления знаний, дополнительные материалы для изучения. Третьим этапом создания электронного образовательного ресурса по теории магнитных явлений является разработка тематических материалов электронного образовательного ресурса: написание статей, создание интерактивных заданий и примеров решения задач, подбор дополнительных материалов по магнетизму. Четвёртым этапом создания электронного образовательного ресурса по теории магнитных явлений является тестирование электронного образовательного ресурса на предмет ошибок и удобства использования, а также получение обратной связи от студентов и коллег-преподавателей. Пятым этапом создания электронного образовательного ресурса по теории магнитных явлений является оформление электронного образовательного ресурса по магнетизму в виде веб-сайта. Шестым этапом создания электронного образовательного ресурса по теории магнитных явлений является привлечение пользователей путём распространения информации о ресурсе среди студентов, преподавателей и научных сообществ. Седьмым этапом создания электронного образовательного ресурса по теории магнитных явлений является регулярное обновление материалов электронного образовательного ресурса с учётом новых исследований и разработок в области теории магнитных явлений. Восьмым этапом создания электронного образовательного ресурса по теории магнитных явлений является анализ результатов использования ресурса для оценки его эффективности и определения направлений для дальнейшего развития. Девятым этапом создания электронного образовательного ресурса по теории магнитных явлений является обеспечение технической поддержки пользователей электронного образовательного ресурса по магнетизму в случае возникновения у них вопросов и трудностей. Десятым

этапом создания электронного образовательного ресурса по теории магнитных явлений является мониторинг и анализ отзывов пользователей для улучшения качества и удобства использования электронного образовательного ресурса по магнетизму.

Рассмотрим создание структуры электронного образовательного ресурса по магнетизму. После определения цели и задач можно приступить к созданию структуры электронного образовательного ресурса. Структура должна быть логичной и понятной для пользователя, чтобы он мог легко найти нужную информацию. Структура электронного образовательного ресурса включает несколько разделов.

Первым разделом электронного образовательного ресурса является введение в магнетизм, в котором кратко излагаются основные понятия и определения, связанные с магнетизмом. Электромагнетизм — это раздел физики, который изучает электромагнитное взаимодействие между электрическими зарядами и электрическими токами, а также магнитными полями. Это взаимодействие проявляется в виде электромагнитных сил, которые могут быть как притягивающими, так и отталкивающими. Основные понятия электромагнетизма включают в себя электрический заряд, электрический ток, магнитное поле, электромагнитные волны и их свойства. Электромагнетизм имеет множество приложений в различных областях науки и техники, таких как электроника, электротехника, радиотехника, оптика, астрономия.

Вторым разделом электронного образовательного ресурса является система законов и принципов магнетизма, в котором содержится подробное описание основных законов и принципов магнетизма. Согласно принципу суперпозиции магнитных полей, если есть несколько источников магнитного поля, то поле, создаваемое каждым источником, суммируется с магнитными полями от других источников.

Третьим разделом электронного образовательного ресурса является банк примеров решения физических задач по теории магнитных явлений, включающий примеры решения различных физических задач по магнетизму, которые помогут студентам освоить практические навыки. Рассматриваются задачи на магнитное поле тока, включающие расчёт индукции магнитного поля, изучение его зависимости от силы тока и расстояния до проводника. Рассматриваются задачи на движение зарядов в магнитном поле, включающие расчёт траекторий заряженных частиц, движущихся в магнитном поле, изучение влияния различных параметров магнитного поля на движение зарядов.

Четвёртым разделом электронного образовательного ресурса является система интерактивных заданий по магнетизму, содержащая набор интерактивных задач и упражнений, направленных на закрепление полученных знаний по магнетизму.

Пятым разделом электронного образовательного ресурса является набор дополнительных материалов по магнетизму, в котором размещены ссылки на дополнительные материалы по магнетизму, такие как видеоуроки, презентации и материалы факультативных курсов по магнетизму.

Систематизация интерактивных заданий и дополнительных материалов на электронном образовательном ресурсе по магнетизму позволяет учащимся лучше усваивать сложные концепции, развивает их аналитические и практические навыки, а также повышает интерес к изучению данного предмета. Правильное использование разнообразных форм заданий и наглядных материалов делает процесс обучения более эффективным и увлекательным. Первым принципом при систематизации интерактивных заданий и дополнительных материалов по магнетизму является принцип последовательности и логичности изложения материала. Задания и дополнительные материалы должны быть организованы в соответствии с логикой изучения магнетизма: от простых понятий к более сложным. Это поможет учащимся легче воспринимать информацию и усваивать её. Вторым принципом при систематизации интерактивных заданий и дополнительных материалов по магнетизму является принцип разнообразия материала

электронного образовательного ресурса по магнетизму. Для повышения мотивации и интереса учащихся к изучению магнетизма следует использовать разнообразные виды заданий, такие как тесты, задачи, игры, видеоматериалы. Третьим принципом при систематизации интерактивных заданий и дополнительных материалов по магнетизму является принцип доступности материалов электронного образовательного ресурса по магнетизму. Все материалы материала электронного образовательного ресурса по магнетизму должны быть доступны для понимания учащимися и соответствовать их уровню знаний. Четвёртым принципом при систематизации интерактивных заданий и дополнительных материалов по магнетизму является принцип наглядности материалов электронного образовательного ресурса по магнетизму. Использование наглядных материалов, таких как графики, схемы и анимации, может значительно облегчить понимание сложных концепций.

Опишем результаты разработки материалов электронного образовательного ресурса по магнетизму. Для создания электронного образовательного ресурса по магнетизму необходимо разработать качественные теоретические материалы и качественные контрольно-измерительные материалы.

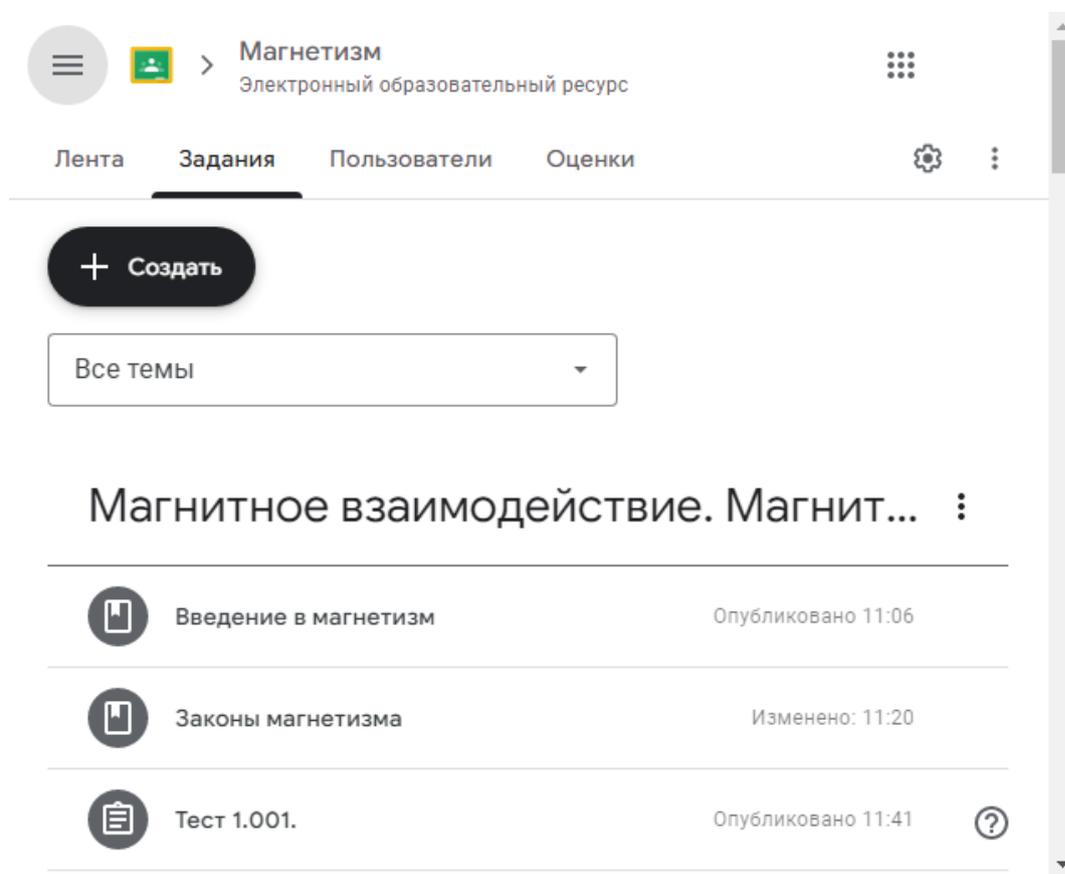


Рис. 1. Страница электронного образовательного ресурса по магнетизму, содержащая вводные теоретические сведения, теоретические сведения о законах магнетизма, тест по магнетизму.

На рис. 1 изображена страница электронного образовательного ресурса по магнетизму, содержащая вводные теоретические сведения, теоретические сведения о законах магнетизма, тест по магнетизму. Теоретические материалы должны быть понятными, структурированными и содержательными. При написании теоретических материалов и создании заданий в виде тестов, задач, интерактивных заданий следует использовать наглядные примеры, графики и иллюстрации по магнетизму.

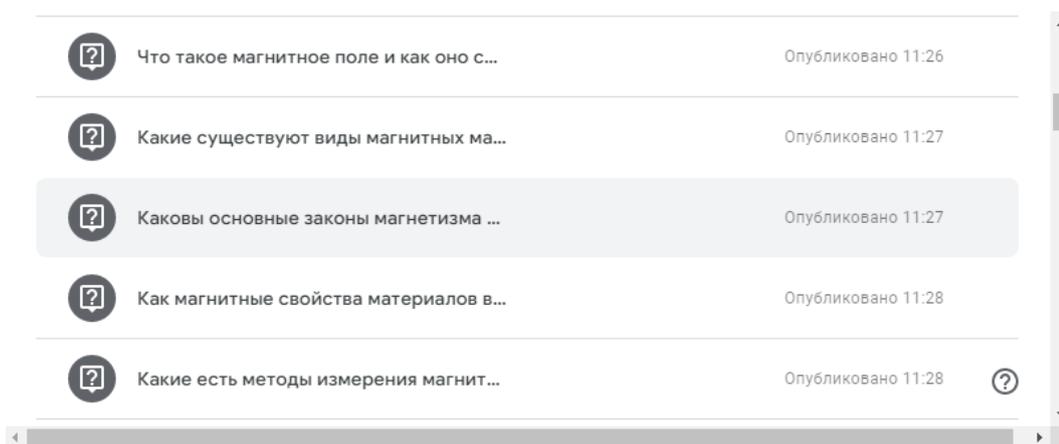


Рис. 2. Страница электронного образовательного ресурса по магнетизму, содержащая контрольные вопросы по магнетизму.

На рис. 2 изображена страница электронного образовательного ресурса по магнетизму, содержащая контрольные вопросы по магнетизму.

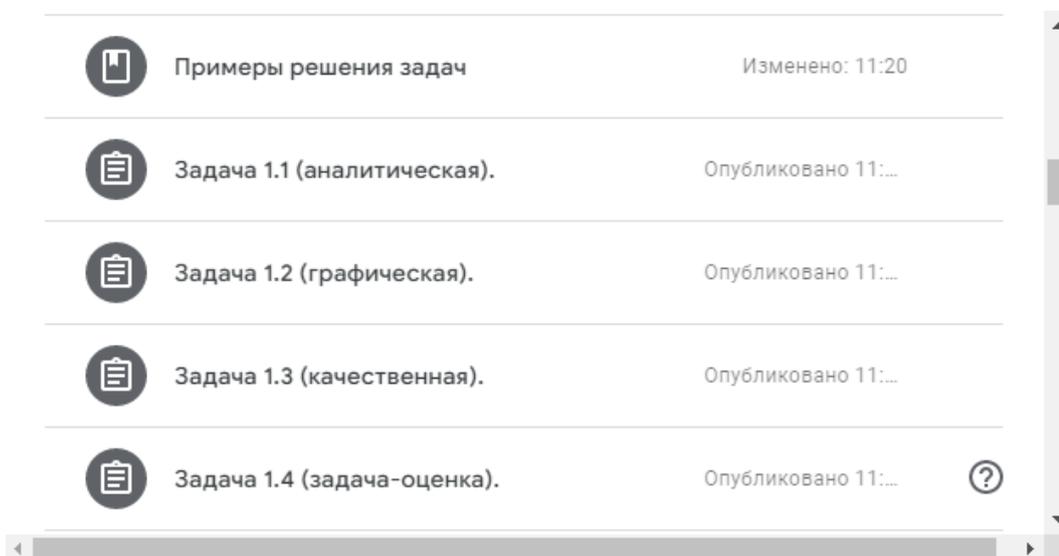


Рис. 3. Страница электронного образовательного ресурса по магнетизму, содержащая примеры решения задач и задания в виде физических задач разных типов по магнетизму.

На рис. 3 изображена страница электронного образовательного ресурса по магнетизму, содержащая примеры решения задач и задания в виде физических задач разных типов по магнетизму.

На рис. 4 изображена страница электронного образовательного ресурса по магнетизму, содержащая упражнения, интерактивные задания и дополнительные материалы по магнетизму.

Перед тем, как опубликовать электронный образовательный ресурс по магнетизму, необходимо провести тестирование электронного образовательного ресурса по магнетизму. Тестирование может включать проверку на наличие ошибок, удобство навигации, соответствие содержания целям и задачам ресурса. Также можно провести опрос среди студентов или коллег-преподавателей для получения обратной связи и улучшения ресурса.

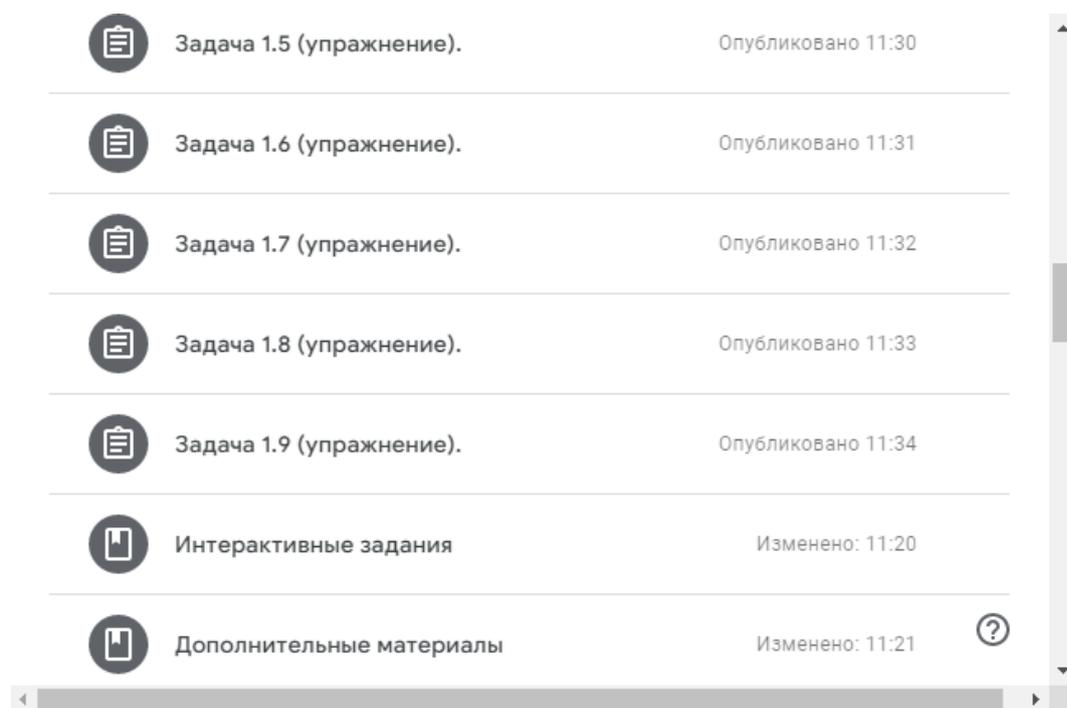


Рис. 4. Страница электронного образовательного ресурса по магнетизму, содержащая упражнения, интерактивные задания и дополнительные материалы по магнетизму.

Разработка системы задач и заданий в составе электронного образовательного ресурса по магнетизму

Задача 1 (аналитическая). Два магнита притягиваются друг к другу с силой F_1 , когда расстояние между ними равно r_1 . Если расстояние увеличивается до r_2 , то сила притяжения уменьшается до F_2 . Найдите зависимость силы притяжения между магнитами от расстояния между ними.

Задача 2 (графическая). Построить график зависимости силы магнитного взаимодействия между двумя магнитами с одинаковыми полюсами от расстояния между ними, если известно, что при расстоянии r_1 сила взаимодействия равна F_1 , а при расстоянии r_2 сила взаимодействия равна F_2 .

Задача 3 (качественная). Как изменится сила магнитного взаимодействия между двумя одинаковыми магнитами, если один магнит повернуть другим полюсом к другому магниту?

Задача 4 (задача-оценка). Оцените максимальное расстояние, на котором два магнита могут притягиваться друг к другу, если их сила взаимодействия должна быть не меньше 1 Н.

Упражнение 1. Проведите эксперимент с компасом, чтобы определить направление магнитного поля Земли.

Упражнение 2. Исследуйте, как различные типы магнитов взаимодействуют друг с другом, используя различные материалы и формы магнитов.

Упражнение 3. Создайте магнитное поле с помощью электромагнита или катушки с током, а затем изучите его свойства.

Упражнение 4. Рассмотрите примеры использования магнитных свойств в различных технических устройствах, таких как электродвигатели, генераторы, магнитные сепараторы и т.д.

Упражнение 5. Исследуйте физические свойства различных магнитных материалов, таких как железо, никель, кобальт и их сплавы, а также ферромагнитные и антифер-

ромагнитные материалы.

Контрольные вопросы:

Что такое магнитное поле и как оно создается?

Какие существуют виды магнитных материалов и как они используются?

Каковы основные законы магнетизма и как они применяются в технике?

Как магнитные свойства материалов влияют на их использование в различных устройствах?

Какие есть методы измерения магнитных свойств материалов и как они работают?

Тестовые задания по магнетизму:

Какое из утверждений верно? а) Магнитное поле создается только движущимися электрическими зарядами. б) Магнитные поля могут существовать независимо от электрических зарядов. в) Магнитные и электрические поля всегда существуют вместе. г) Магнитные поля являются свойством только определенных материалов.

Что из перечисленного является примером магнитного материала? а) воздух, б) вода, в) железо, г) золото.

Что происходит с магнитным полем вокруг проводника с током, если ток увеличивается? а) сила магнитного поля увеличивается б) направление магнитного поля изменяется в) магнитное поле исчезает, г) магнитное поле становится слабее.

Какой закон магнетизма описывает взаимодействие двух магнитов? а) Закон Кулона б) Закон Ампера в) Закон Ома г) Закон Фарадея.

Как можно измерить магнитные свойства материала? а) с помощью амперметра, б) с помощью вольтметра, в) с помощью магнитометра, г) с помощью спектрометра.

Индивидуальные задания творческого характера:

Задание 1. Компания разрабатывает новый тип электродвигателя, который будет использоваться в электромобилях. Необходимо разработать систему магнитов и обмоток двигателя, обеспечивающую высокую эффективность и мощность при минимальных размерах и массе.

Задание 2. Научно-исследовательский институт проводит эксперименты по использованию магнитных полей для лечения онкологических заболеваний. Необходимо разработать методику проведения таких экспериментов и оценить возможные риски и преимущества такого подхода.

Задание 3. На предприятии по переработке металлолома возникла проблема с работой магнитного сепаратора. Требуется провести диагностику оборудования, выявить неисправность и предложить способы её устранения.

Задание 4. Энергетическая компания планирует установить магнитные насосы для перекачки воды на гидроэлектростанции. Необходимо рассчитать оптимальные параметры магнитных систем насосов, а также оценить эффективность и экологичность такого подхода по сравнению с традиционными решениями.

Задание 5. Научно-производственная компания производит магнитные крепления для мебели и предметов интерьера. Возникла необходимость разработать новые типы креплений для различных условий использования, а также улучшить дизайн существующих моделей.

Заключение

Разработка электронного образовательного ресурса по магнетизму требует времени и усилий, но результаты могут значительно улучшить процесс преподавания курса физики. Использование электронного образовательного ресурса по магнетизму позволяет студентам изучать теоретический материал по магнетизму в своём темпе, возвращаться к сложным темам по магнетизму и получать доступ к дополнительной информации

по применению магнитных явлений в технике. С помощью электронного образовательного ресурса по магнетизму студенты смогут лучше усваивать материал, готовиться к экзаменам и развивать свои навыки в области магнетизма.

В заключении проведённого исследования можно сделать вывод о том, что разработанный электронный образовательный ресурс по магнетизму может быть использован для разработки новых систем подготовки в средних и высших образовательных учреждениях.

Задачи работы решены полностью.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если магнитные поля действительно оказывают значительное влияние на физические свойства различных магнитных материалов, то это влияние может быть использовано для создания новых технических решений и совершенствования существующих технологий создания приборов и устройств на основе магнитных материалов, подтверждена полностью.

Степень достижения гипотезы исследования можно оценить как высокую. Были подтверждены предположения о влиянии магнитных полей на свойства различных видов материалов и о возможности использования полученных данных для разработки новых методов и технологий.

Список использованных источников

1. Natsiopoulou Georgios, Angelakeris Makis. A novel e-learning tool for magnetism and magnetic materials // International Journal of Didactical Studies. — 2023. — jul. — URL: <http://dx.doi.org/10.33902/ijods.202319972>.
2. Support materials for teaching electromagnetism / A. M. Lopez-Torres [et al.] // 2022 Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference). — IEEE, 2022. — jun. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TAEE54169.2022.9840597>.
3. Hirano Takuichi, Hirokawa Jiro. Education materials of electricity and magnetism using MATLAB // 2017 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology. — IEEE, 2017. — aug. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/RFIT.2017.8048275>.
4. Report and recommendations on multimedia materials for teaching and learning electricity and magnetism / E. Debowska [et al.] // European Journal of Physics. — 2013. — apr. — Vol. 34, no. 3. — P. L47–L54. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/34/3/L47>.
5. Salmi Khalid, Magrez Hamid, Ziyat Abdelhak. Didactic simulations for electromagnetism based on an element oriented model // International Journal of Engineering Pedagogy. — 2019. — nov. — Vol. 9, no. 5. — P. 24. — URL: <http://dx.doi.org/10.3991/IJEP.V9I5.10696>.
6. Prasad Nisha, Jain Shailendra, Gupta Sushma. An educational tool based on finite element method for electromagnetic study // The International Journal of Electrical Engineering and Education. — 2020. — jul. — Vol. 58, no. 4. — P. 828–848. — URL: <http://dx.doi.org/10.1177/0020720920940572>.
7. Perry Jonathan D., Erukhimova Tatiana L., Bassichis William H. New video resource for calculus-based introductory physics, design and assessment. I. electricity and magnetism // American Journal of Physics. — 2019. — may. — Vol. 87, no. 5. — P. 335–340. — URL: <http://dx.doi.org/10.1119/1.5095140>.

8. Buret F., Muller D., Nicolas L. Computer-aided education for magnetostatics // IEEE Transactions on Education. — 1999. — Vol. 42, no. 1. — P. 45–49. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/13.746334>.
9. Electromagnetic fields in magnetic materials: a resource letter / S. A. Wymer [et al.] // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. — 1994. — nov. — Vol. 15, no. 11. — P. 1981–2000. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02096062>.
10. Smith S. R. P., King G. D. A computer simulation of magnetism // European Journal of Physics. — 1987. — apr. — Vol. 8, no. 2. — P. 131–137. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/8/2/011>.
11. Electromagnetism as a means for understanding materials mechanics phenomena in magnetic materials / C. Boller [et al.] // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. — 2011. — apr. — Vol. 42, no. 4. — P. 269–278. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/MAWE.201100761>.
12. Shimizu H., Shirai M., Suzuki N. Electronic structure and magnetism of transition-metal mononitrides // Physica B: Condensed Matter. — 1997. — jul. — Vol. 237-238. — P. 546–547. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4526\(97\)00223-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4526(97)00223-8).
13. Electronic structure and magnetism in actinide compounds / T. Durakiewicz [et al.] // Physica B: Condensed Matter. — 2006. — may. — Vol. 378-380. — P. 1033–1034. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.PHYSB.2006.01.527>.
14. Zaslavskaya O. Y. Principles of content formation educational electronic resource // RUDN Journal of Informatization in Education. — 2017. — Vol. 14, no. 3. — P. 309–316. — URL: <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8631-2017-14-3-309-316>.
15. Fisher W. M., Oliveira S. L., Rand S. C. Implications of electronic structure for optical magnetism // 2008 Conference on Lasers and Electro-Optics. — IEEE, 2008. — may. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/CLEO.2008.4552286>.
16. Ukoh Edidiong Enyeneokpon. Teaching electromagnetism using interactive-invention instructional strategy and the learning outcome of secondary school students // Momentum: Physics Education Journal. — 2022. — jan. — P. 10–18. — URL: <http://dx.doi.org/10.21067/mpej.v6i1.5463>.
17. Oyman Serteller Necibe Fusun. An educational study of electromagnetic phenomena on ferromagnetic structure using a software environment // Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences. — 2023. — dec. — Vol. 94, no. 1. — P. 37–45. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s40010-023-00864-6>.

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

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

Development of an electronic educational resource on the theory of magnetic phenomena

O. N. Zakharova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted March 25, 2024
 Resubmitted March 27, 2024
 Published June 12, 2024

Abstract. The results of the development of an electronic educational resource on the theory of magnetic phenomena are presented.

Keywords: magnetism, theory of magnetic phenomena, physics course, electronic educational resource, methods of teaching the theory of magnetic phenomena

References

1. Natsiopoulos Georgios, Angelakeris Makis. A novel e-learning tool for magnetism and magnetic materials // *International Journal of Didactical Studies*. — 2023. — jul. — URL: <http://dx.doi.org/10.33902/ijods.202319972>.
2. Support materials for teaching electromagnetism / A. M. Lopez-Torres [et al.] // 2022 Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference). — IEEE, 2022. — jun. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TAEE54169.2022.9840597>.
3. Hirano Takuichi, Hirokawa Jiro. Education materials of electricity and magnetism using MATLAB // 2017 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology. — IEEE, 2017. — aug. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/RFIT.2017.8048275>.
4. Report and recommendations on multimedia materials for teaching and learning electricity and magnetism / E. Debowska [et al.] // *European Journal of Physics*. — 2013. — apr. — Vol. 34, no. 3. — P. L47–L54. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/34/3/L47>.
5. Salmi Khalid, Magrez Hamid, Ziyat Abdelhak. Didactic simulations for electromagnetism based on an element oriented model // *International Journal of Engineering Pedagogy*. — 2019. — nov. — Vol. 9, no. 5. — P. 24. — URL: <http://dx.doi.org/10.3991/IJEP.V9I5.10696>.
6. Prasad Nisha, Jain Shailendra, Gupta Sushma. An educational tool based on finite element method for electromagnetic study // *The International Journal of Electrical Engineering and Education*. — 2020. — jul. — Vol. 58, no. 4. — P. 828–848. — URL: <http://dx.doi.org/10.1177/0020720920940572>.

7. Perry Jonathan D., Erukhimova Tatiana L., Bassichis William H. New video resource for calculus-based introductory physics, design and assessment. I. electricity and magnetism // *American Journal of Physics*. — 2019. — may. — Vol. 87, no. 5. — P. 335–340. — URL: <http://dx.doi.org/10.1119/1.5095140>.
8. Buret F., Muller D., Nicolas L. Computer-aided education for magnetostatics // *IEEE Transactions on Education*. — 1999. — Vol. 42, no. 1. — P. 45–49. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/13.746334>.
9. Electromagnetic fields in magnetic materials: a resource letter / S. A. Wymer [et al.] // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. — 1994. — nov. — Vol. 15, no. 11. — P. 1981–2000. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02096062>.
10. Smith S. R. P., King G. D. A computer simulation of magnetism // *European Journal of Physics*. — 1987. — apr. — Vol. 8, no. 2. — P. 131–137. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/8/2/011>.
11. Electromagnetism as a means for understanding materials mechanics phenomena in magnetic materials / C. Boller [et al.] // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. — 2011. — apr. — Vol. 42, no. 4. — P. 269–278. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/MAWE.201100761>.
12. Shimizu H., Shirai M., Suzuki N. Electronic structure and magnetism of transition-metal mononitrides // *Physica B: Condensed Matter*. — 1997. — jul. — Vol. 237-238. — P. 546–547. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4526\(97\)00223-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4526(97)00223-8).
13. Electronic structure and magnetism in actinide compounds / T. Durakiewicz [et al.] // *Physica B: Condensed Matter*. — 2006. — may. — Vol. 378-380. — P. 1033–1034. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.PHYSB.2006.01.527>.
14. Zaslavskaya O. Y. Principles of content formation educational electronic resource // *RUDN Journal of Informatization in Education*. — 2017. — Vol. 14, no. 3. — P. 309–316. — URL: <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8631-2017-14-3-309-316>.
15. Fisher W. M., Oliveira S. L., Rand S. C. Implications of electronic structure for optical magnetism // *2008 Conference on Lasers and Electro-Optics*. — IEEE, 2008. — may. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/CLEO.2008.4552286>.
16. Ukoh Edidiong Enyeneokpon. Teaching electromagnetism using interactive-invention instructional strategy and the learning outcome of secondary school students // *Momentum: Physics Education Journal*. — 2022. — jan. — P. 10–18. — URL: <http://dx.doi.org/10.21067/mpej.v6i1.5463>.
17. Oyman Serteller Necibe Fusun. An educational study of electromagnetic phenomena on ferromagnetic structure using a software environment // *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*. — 2023. — dec. — Vol. 94, no. 1. — P. 37–45. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s40010-023-00864-6>.

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

Научная статья
 УДК 372.853
 ББК 74.489
 ГРНТИ 14.35.09
 ВАК 5.8.2.
 PACS 01.40.-d
 OCIS 000.2060
 MSC 00A79

Методические аспекты описания термодинамических свойств технических систем с помощью энтропии газа в каноническом ансамбле

И. А. Малова  ¹

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

Поступила в редакцию 15 марта 2024 года

После переработки 18 марта 2024 года

Опубликована 12 июня 2024 года

Аннотация. Рассматривается проблема вычисления энтропии газа в каноническом ансамбле, анализируются термодинамические свойства газов и связь между макроскопическими и микроскопическими параметрами системы. Развивается статистический подход к описанию термодинамических свойств газов с использованием энтропии на основе методов статистической физики. Результаты исследования могут быть применены для развития методов расчёта энергетических и кинетических свойств газов.

Ключевые слова: газ, энтропия, свойства энтропии, канонический ансамбль, статистический подход, термодинамический процесс

Введение

Исследование энтропии идеального газа в каноническом ансамбле представляет собой важную задачу в статистической физике и термодинамике. Актуальность исследования энтропии газа в каноническом ансамбле заключается в изучении термодинамических свойств газов и определении связи между макроскопическими параметрами системы и микроскопическим движением частиц. Научная новизна заключается в разработке новых подходов к описанию поведения газов на основе квантовой механики и статистической физики. Оценка возможностей практической реализации включает применение полученных результатов для разработки более точных моделей и методов расчёта энергетических и кинетических свойств газов, что может способствовать развитию технологий в области термодинамики.

Целью исследования является теоретическое описание термодинамических процессов и циклов, используемых в работе тепловых машин и холодильников, с помощью выражений энтропии в канонического ансамбле. Задачи исследования включают в себя

¹E-mail: ira.malova.02@mail.ru

анализ научных литературных источников по описанию термодинамических свойств систем с помощью выражения энтропии в каноническом ансамбле, раскрытие теоретического вопроса по описанию термодинамических процессов систем с помощью выражения энтропии канонического ансамбля, построение графиков термодинамических циклов систем по полученным выражениями энтропии на различных диаграммах.

Объектом является газ в качестве рабочего тела тепловых систем. Предметом исследования является термодинамические свойства энтропии газов, используемых в тепловых системах в каноническом ансамбле.

Гипотеза исследования состоит в том, что если внедрить теоретические сведения о методах вычисления энтропии газов тепловых систем в каноническом ансамбле, то можно усовершенствовать методологию преподавания раздела по статистической физике и термодинамике в рамках модульного курса теоретической физики в университетах.

Обзор

Проблема определения энтропии идеального газа возникла ещё в XIX веке, когда Рудольф Клаузиус ввёл понятие энтропии как функцию состояния системы. Исследование энтропии идеального газа в каноническом ансамбле имеет долгую историю, начиная с работ Людвиг Больцмана в конце XIX века. Больцман ввёл понятие энтропии и сформулировал знаменитое уравнение $S = k \ln w$, которое связывает энтропию S с плотностью вероятности состояний w . Это уравнение лежит в основе статистической физики и используется для описания свойств систем в равновесии. Однако определение энтропии для идеального газа оказалось неоднозначным, так как существует несколько способов описания микросостояния системы. История проблемы связана с развитием статистической физики. Основная цель статистической физики состоит в том, чтобы связать макроскопическое описание термодинамических систем с микроскопическим механическим описанием систем, состоящих из большого числа частиц. Для этого нужно сопоставить равновесное состояние в термодинамическом смысле (описываемое термодинамическими параметрами) с механическими состояниями, которые описываются координатами и импульсами частиц. Проблема была решена Гиббсом на основе представлений об ансамбле систем и вероятностных распределений, которые теперь носят его имя.

В каноническом ансамбле энтропия газа решающим образом связана с его термодинамическим поведением. Производство энтропии открытой системы, связанной с резервуаром в каноническом состоянии, включает в себя два ключевых теоретико-информационных вклада: взаимную информацию система-ванна и относительную энтропию, отражающую смещение окружающей среды от равновесия [1, 2]. В каноническом ансамбле энтропия газа максимальна при равновесии, характеризующемся общей температурой T и максимальной полной энтропией. Энтропия газа в каноническом ансамбле строго определена для гибридных квантово-классических систем, причём классические и квантовые пределы совпадают с обычными каноническими ансамблями [2]. Более того, для идеального Бозе-газа ниже температуры конденсации Бозе-Эйнштейна корреляционная часть энтропии компенсируется вкладом основного состояния, что упрощает описание термодинамических свойств газа в каноническом ансамбле за счёт исключения основного состояния и предположения отсутствия корреляция между возбуждёнными уровнями [3]. Эти открытия подчеркивают сложную взаимосвязь между энтропией, статистическими ансамблями и термодинамическими характеристиками газов в каноническом ансамбле.

Канонический ансамбль определяет энтропию на основе энергии, поддерживая отрицательные температуры. Канонический ансамбль предсказывает правильные термодинамические свойства газов, в отличие от микроканонических определений [4]. На

протяжении более 100 лет одной из центральных концепций статистической механики был микроканонический ансамбль, который обеспечивает способ расчёта термодинамической энтропии для заданной энергии. Недавно возник спор между двумя различными определениями энтропии, основанными на микроканоническом ансамбле: энтропия Больцмана, определяемая плотностью состояний при заданной энергии, и энтропия Гиббса, определяемая суммой или интегралом плотности состояний ниже заданной энергии. Критическое различие между следствиями этих определений относится к понятию отрицательных температур, которые по определению Гиббса не могут существовать. В статье [4] ставится под сомнение фундаментальное предположение о том, что микроканонический ансамбль должен использоваться для определения энтропии. В статье [4] основывают анализ на недавно предложенном каноническом определении энтропии как функции энергии. В статье [4] исследуются предсказания Больцмана, Гиббса и канонических определений для множества классических и квантовых моделей. В статье [4] представлены результаты, которые подтверждают справедливость концепции отрицательной температуры, но не для всех моделей с уменьшающейся плотностью состояний. В статье [4] обнаружено, что только каноническая энтропия последовательно предсказывает правильные термодинамические свойства, в то время как микроканонические определения энтропии, включая определения Больцмана и Гиббса, верны только для ограниченного набора моделей. Для моделей, демонстрирующих фазовый переход первого рода, в статье [4] показано, что использование термодинамического предела в его обычном понимании может скрыть суть физики.

Энтропия газа в каноническом ансамбле может быть получена из классической статистической суммы, которая включает функции плотности вероятности в фазовом пространстве и факторы Больцмана, как обсуждается в статье [5]. Классический канонический ансамбль использует функцию плотности вероятности в фазовом пространстве, в которой энергия в факторе Больцмана для квантовой системы заменяется классическим гамильтонианом. Классическая статистическая сумма представляет собой интеграл от этого фактора Больцмана по фазовому пространству. Можно искусственно разделить классическую статистическую сумму на множитель, содержащий степени постоянной Планка, чтобы получить результаты, согласующиеся с квантовой механикой при высоких температурах. В статье [5] проиллюстрируем это на примере идеального газа и рассчитаем истечение из небольшого отверстия. Закон Дюлонга и Пти выведен для гармонического потенциала. В статье [5] вычисляются классические средние канонических координат и импульсов. В статье [5] выводится теорема вириала для средних по времени и используем её для рассмотрения неидеального газа, взаимодействие частиц которого рассчитывается с использованием парной функции распределения. В статье [5] обсуждается использование канонических преобразований при вычислении статистических сумм и вычисляем статистическую сумму вращающейся многоатомной молекулы с использованием якобианов.

В каноническом ансамбле энтропия газа непрерывна и определяется распределением вероятностей по собственным состояниям энергии, что обеспечивает термодинамическую согласованность для конечных систем [6]. Микроканонический ансамбль уже давно стал отправной точкой развития термодинамики из статистической механики. Однако этот подход создает две проблемы. Во-первых, он предсказывает, что энтропия определяется только дискретным набором энергий для конечных квантовых систем, тогда как термодинамика требует, чтобы энтропия была непрерывной функцией энергии. Во-вторых, он не удовлетворяет условию устойчивости ($\Delta S/\Delta U_0$) для переходов первого рода как с классическими, так и с квантовыми системами. Свендсен недавно показал, что источник этих проблем лежит в самом микроканоническом ансамбле, который содержит только собственные состояния энергии и исключает их линейные

комбинации. Напротив, если интересующая система когда-либо находилась в тепловом контакте с другой системой, она будет описываться распределением вероятностей по многим собственным состояниям, которое эквивалентно каноническому ансамблю для достаточно больших систем. Новотный и другие исследователи недавно подтвердили эту картину динамическими численными расчётами для квантово-механической модели, в которых они показали подход к каноническому распределению до 40 квантовых спинов. Упрощая задачу и вычисляя только равновесные свойства, в статье [6] можно распространить демонстрацию на более чем миллион частиц.

В каноническом ансамбле на энтропию идеального Бозе-газа влияют корреляции между флуктуациями частиц и вкладами основного состояния, особенно в области конденсации Бозе-Эйнштейна [7]. Ограничение фиксированного общего числа частиц приводит к корреляции между флуктуациями частиц в разных состояниях канонического ансамбля. В статье [7] показано, что ниже температуры конденсации Бозе-Эйнштейна корреляционная часть энтропии идеального Бозе-газа компенсируется вкладом основного состояния. Таким образом, в области конденсации Бозе-Эйнштейна термодинамические свойства газа в каноническом ансамбле могут быть точно описаны в упрощённой модели [7], исключаяющей основное состояние и предполагающей отсутствие корреляции между возбуждёнными уровнями.

В работе [8] используется метод наиболее вероятного распределения, чтобы показать, что энтропия для общего ансамбля может быть выражена максимальным значением функции беспорядка теории информации при условии соблюдения набора ограничений, соответствующих ансамблю. В работе [8] подробно проиллюстрируем это на примере большого канонического ансамбля с двумя видами частиц. В работе [8] рассматривается ряд других ансамблей практически путём проверки, включая ансамбль, который относится к функции Масье, которая представляет собой преобразование Лежандра энтропии. Используя коэффициент вырождения для суммирования по уровням энергии, числам частиц и объемам, в работе [8] показано, что все ансамбли могут быть связаны аналогичным образом со связанными с ними термодинамическими функциями.

Энтропию газа в каноническом ансамбле можно определить с помощью канонической статистической суммы и выражений равновесия, полученных в рамках метода Максвелла-Больцмана [9]. Метод термодинамики Максвелла-Больцмана используется исключительно для исследования систем, содержащих только независимые частицы. В отличие от метода Максвелла-Больцмана, метод ансамбля Гиббса использовался для исследования систем, состоящих из зависимых частиц. Принципы, типы и основные предположения ансамблей Гиббса были представлены с особым вниманием к каноническому ансамблю. Методы Максвелла-Больцмана и канонического ансамбля связаны между собой. Определены ограничивающие условия, необходимые ограничения и множители Лагранжа. В работе [9] исследовано каноническое распределение, вероятность нахождения и наиболее типичное распределение любого члена, находящегося в определенном квантовом состоянии. Как и метод Максвелла-Больцмана, равновесные выражения термодинамических величин определяются с использованием канонической статистической суммы. В работе [9] получены выражения для канонической статистической суммы для независимых, различимых и неразличимых частиц в разбавленном пределе. Это позволяет получить термодинамические выражения, дублирующие результаты, полученные при реализации метода Максвелла-Больцмана. Наконец, в работе [9] метод канонического ансамбля используется для определения константы равновесия, чтобы показать, что наиболее вероятное распределение является единственным значимым распределением, и получить термодинамические выражения для кристаллического твёрдого тела в соответствии с моделью Эйнштейна.

В микрочаноническом ансамбле конфигурационная энтропия газа включает в се-

бя функцию энтропии Реньи, а не Тсаллиса, из-за равенства температур и точного представления нестабильности вблизи порога вращения [10]. В статье [10] исследуется конфигурационное распределение вероятностей одноатомного газа с конечным числом частиц N в микроканоническом ансамбле. В статье [10] приводятся два аргумента, почему термодинамическая энтропия конфигурационной подсистемы включает в себя энтропийную функцию Реньи, а не Тсаллиса. Первый аргумент состоит в том, что температура конфигурационной подсистемы равна температуре кинетической подсистемы. Вторым аргументом является то, что правильно воспроизводится неустойчивость маятника, возникающая при энергиях, близких к порогу вращения.

Статистическая энтропия модели решётчатого газа в каноническом ансамбле выражается как многочастичное корреляционное разложение, как обсуждается в статье [11]. В статье [11] получена формула, выражающая статистическую энтропию модели решётчатого газа как многочастичное корреляционное разложение в большом каноническом и каноническом ансамблях. В статье [11] выяснены отличия от аналогичного разложения в случае континуума. В статье [11] в качестве примера рассматривается одномерная модель Изинга.

Энтропия твёрдого решётчатого газа в каноническом ансамбле точно оценивается с использованием методов моделирования Монте-Карло, что даёт ценную информацию о поведении системы [12].

Методы и материалы

Идеальный газ является одной из ключевых моделей для описания поведения вещества в условиях различных температур и давлений. Идеальный газ — это модель, используемая в молекулярной физике и термодинамике для описания поведения газов при определённых условиях. Рассмотрим идеальный газ как систему, состоящую из большого числа частиц, взаимодействующих друг с другом и с окружающей средой. Канонический ансамбль — это статистическая модель, которая позволяет описывать макроскопические свойства системы, состоящей из большого числа частиц. Понимание энтропии газов позволяет прогнозировать термодинамические свойства газов, что имеет значительное практическое применение в различных областях прикладной науки и техники.

Модель идеального газа является простейшим приближением для описания термодинамических свойств газов в физико-технических системах. Для описания термодинамических свойств газов используется статистический подход. Статистическое описание газов в каноническом ансамбле учитывает флуктуации энергии в термодинамической системе. Одной из важнейших термодинамических функций является энтропия. Изоэнтропический процесс, происходящий при постоянной энтропии, используется в термодинамических циклах тепловых машин и тепловых двигателей, поэтому тема работы является актуальной темой исследования в области современной статистической физики и термодинамики. Впервые производится сравнение выражений энтропии для реальных газов в термодинамических циклах тепловых машин и холодильников с выражением энтропии идеального газа тепловых машин и холодильников в каноническом ансамбле.

Методы исследования включают в себя статистический метод исследования термодинамических систем для исследования энтропии газов в тепловых машинах и холодильниках, термодинамический метод и математические методы для решения уравнений термодинамики. Для исследования энтропии газа в каноническом ансамбле используются методы статистической физики в применении к рассмотрению распределения вероятностей частиц газа по различным энергетическим состояниям при постоянной температуре и объёме. Основной подход заключается в том, чтобы вычислить вероятность каждого микросостояния системы и затем вычислить энтропию с помощью урав-

нения Больцмана. Материалы исследования включают в себя литературные источники по термодинамике газов в тепловых машинах и холодильниках. Теоретическая значимость заключается в том, что раскрыт вопрос об энтропии идеального газа и реальных газов, тепловых машин и холодильников в каноническом ансамбле для курса статистической физики и термодинамики. Практическая значимость работы заключается в том, что термодинамические процессы и циклы лежат в основе работы современных тепловых машин и холодильников.

Результаты

Энтропия идеального газа в каноническом ансамбле является функцией состояния системы, которая зависит от микросостояний газа и его термодинамических параметров. Энтропия газа пропорциональна логарифму числа доступных микросостояний системы и может быть вычислена с помощью уравнения $S = k \ln w$. Энтропия газа является аддитивной величиной. Энтропия газа в каноническом ансамбле может быть использована для вычисления термодинамических свойств системы, таких как теплоёмкость и внутренняя энергия. Энтропия газа состоит из двух составляющих: энтропии поступательного движения молекул и энтропии вращательного движения молекул газа. Энтропия газа зависит от температуры, объёма и количества частиц.

Изменение энтропии в политропных процессах может быть вычислено по формулам:

$$\Delta S = C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad (1)$$

$$\Delta S = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}, \quad (2)$$

$$\Delta S = C_V \ln \frac{p_2}{p_1} + C_p \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (3)$$

Из формулы (1) при $V = const$ получим изменение энтропии в изохорном процессе:

$$\Delta S = C_V \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (4)$$

Из формулы (1) при $p = const$ получим изменение энтропии в изобарном процессе:

$$\Delta S = C_p \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (5)$$

В адиабатическом процессе изменение энтропии равно нулю.

$$\Delta S = 0. \quad (6)$$

Адиабатический процесс часто называют изоэнтропийным процессом. Адиабатический процесс характеризуется тем, что он происходит без теплообмена ($\delta Q = 0$).

Формула для расчёта энтропии идеального газа для изотермического процесса:

$$S = \nu R \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad (7)$$

где S – энтропия газа, ν – количество вещества газа, R – универсальная газовая постоянная, V_1 и V_2 – начальный и конечный объёмы газа соответственно.

Формула для расчёта энтропии идеального газа для адиабатического процесса:

$$S = \nu C_V \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad (8)$$

где S – энтропия газа, ν – количество вещества газа, C_V – молярная теплоёмкость газа при постоянном объёме, T_1 и T_2 – начальная и конечная температуры газа соответственно.

Проанализированы выражения для определения энтропии идеального газа в каноническом ансамбле. Энтропия идеального газа в каноническом ансамбле определяется как сумма двух составляющих: энтропии поступательного движения молекул и энтропии вращательного движения молекул. В результате исследования изучена зависимость энтропии газов от температуры, объёма и количества частиц газа. Энтропия идеального газа зависит от температуры, объёма и количества частиц газа. При увеличении температуры или уменьшении объёма энтропия увеличивается, а при увеличении количества частиц энтропия уменьшается. Выявлена связь энтропии с другими термодинамическими функциями. Показано, что энтропия идеального газа связана с другими термодинамическими функциями, такими как внутренняя энергия, свободная энергия и потенциал Гиббса.

Заключение

В ходе исследования были получены новые знания об энтропии газа в каноническом ансамбле. Исследование позволило подтвердить теоретические предположения о поведении энтропии идеального газа в каноническом ансамбле, которые соответствуют физическим принципам статистической физики.

Вычисление энтропии идеального газа в каноническом ансамбле с помощью уравнения $S = k \ln w$ является важным результатом, так как оно позволяет связать термодинамические свойства системы с её статистическими характеристиками. Аддитивность энтропии газа в каноническом ансамбле имеет важные последствия для термодинамики, так как она позволяет вычислять энтропию сложных систем путём сложения энтропий составляющих сложной системы. Независимость энтропии газа в каноническом ансамбле от внешних условий, таких как давление и объём, имеет важные последствия для термодинамики, так как она позволяет вычислять энтропию системы в различных условиях. Использование энтропии газа в каноническом ансамбле для вычисления термодинамических свойств системы, таких как теплоёмкость и внутренняя энергия, является важным результатом, так как оно позволяет связать статистические характеристики системы с её термодинамическими свойствами.

По результатам работы могут быть сформулированы следующие выводы:

1. энтропия играет важную роль при описании термодинамических процессов в газах, поскольку вычисление энтропии идеального газа в каноническом ансамбле с помощью уравнения $S = k \ln w$ является важным результатом, так как оно позволяет связать термодинамические свойства системы с её статистическими характеристиками, что имеет важные последствия для термодинамики;
2. изучение энтропии газов в каноническом ансамбле позволяет лучше понять термодинамические свойства газов, например, аддитивность энтропии газа в каноническом ансамбле имеет важное значение для термодинамики, так как она позволяет вычислять энтропию сложных систем путём сложения энтропий составляющих системы, что является важным результатом для термодинамики;
3. результаты исследования могут быть использованы для улучшения прогнозирования поведения термодинамических систем с газами в различных условиях на основе вычисления термодинамических свойств системы, таких как теплоёмкость и внутренняя энергия, являющейся важным результатом, позволяющим связать статистические характеристики системы с термодинамическими свойствами системы.

В результате исследования энтропии газа в каноническом ансамбле были выявлены термодинамические свойства газов и установлена связь между макроскопическими и микроскопическими параметрами системы. Это позволило развить статистический подход к описанию поведения газов на основе методов статистической физики. Полученные результаты имеют важное значение для развития термодинамики.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если внедрить теоретические сведения о методах вычисления энтропии газов тепловых машин и холодильников в каноническом ансамбле, то можно усовершенствовать методологию преподавания раздела по статистической физике и термодинамике в рамках модульного курса теоретической физики в университетах, подтверждена полностью.

Полученные результаты подтверждают гипотезу исследования и позволяют более глубоко понять природу энтропии идеального газа в каноническом ансамбле. Однако некоторые вопросы остаются открытыми, например, влияние внешних факторов на энтропию газа или связь энтропии с другими макроскопическими параметрами системы.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего теоретического изучения физических свойств газов и разработки новых методов описания и анализа термодинамических свойств реальных газов, используемых в современных технических системах. Полученные результаты также указывают на необходимость дальнейшего изучения энтропии газа в каноническом ансамбле с целью повышения точности существующих моделей и методов расчёта энергетических и кинетических свойств газов. Это может привести к созданию более эффективных и экологически безопасных технологий в термодинамике.

Список использованных источников

1. Pathria R. K., Beale Paul D. The canonical ensemble // *Statistical Mechanics*. — Elsevier, 2022. — P. 39–91. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-102692-2.00012-0>.
2. Entropy and canonical ensemble of hybrid quantum classical systems / J. L. Alonso [et al.] // *Physical Review E*. — 2020. — oct. — Vol. 102, no. 4. — P. 042118. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVE.102.042118>.
3. Ptaszynski Krzysztof, Esposito Massimiliano. Ensemble dependence of information-theoretic contributions to the entropy production // *Physical Review E*. — 2023. — may. — Vol. 107, no. 5. — P. 052102. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.107.L052102>.
4. Comparison of canonical and microcanonical definitions of entropy / Michael Matty [et al.] // *Physica A: statistical mechanics and its applications*. — 2017. — feb. — Vol. 467. — P. 474–489. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.PHYSA.2016.10.030>.
5. Sekerka Robert F. Classical canonical ensemble // *Thermal Physics*. — Elsevier, 2015. — P. 337–358. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803304-3.00020-X>.
6. Griffin William, Matty Michael, Swendsen Robert H. Finite thermal reservoirs and the canonical distribution // *Physica A: statistical mechanics and its applications*. — 2017. — oct. — Vol. 484. — P. 1–10. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.PHYSA.2017.04.143>.
7. Canonical ensemble ground state and correlation entropy of Bose-Einstein condensate / Anatoly Svidzinsky [et al.] // *New Journal of Physics*. — 2018. — jan. — Vol. 20, no. 1. — P. 013002. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/AA910A>.

8. Sekerka Robert F. Entropy for any ensemble // Thermal Physics. — Elsevier, 2015. — P. 397–403. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803304-3.00022-3>.
9. Stephanos Joseph J., Addison Anthony W. Canonical ensemble // Chemical thermodynamics and statistical aspects. — Elsevier, 2023. — P. 643–670. — ISBN: 9780443152955. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-443-15295-5.00004-1>.
10. Baeten Maarten, Naudts Jan. On the thermodynamics of classical micro-canonical systems // Entropy. — 2011. — jun. — Vol. 13, no. 6. — P. 1186–1199. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/E13061186>.
11. Prestipino Santi, Giaquinta Paolo V. Statistical entropy of a lattice-gas model: multi-particle correlation expansion // Journal of Statistical Physics. — 2000. — Vol. 98, no. 1/2. — P. 507–509. — URL: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1018603728546>.
12. Meirovitch Hagai. A Monte Carlo study of the entropy, the pressure, and the critical behavior of the hard-square lattice gas // Journal of Statistical Physics. — 1983. — mar. — Vol. 30, no. 3. — P. 681–698. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01009683>.

Сведения об авторах:

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

E-mail: ira.malova.02@mail.ru

ORCID iD  0009-0009-2279-7632

Web of Science ResearcherID  JRW-5338-2023

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

Methodological aspects of describing the thermodynamic properties of technical systems using gas entropy in the canonical ensemble

I. A. Malova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted March 15, 2024
Resubmitted March 18, 2024
Published June 12, 2024

Abstract. The problem of calculating the entropy of a gas in a canonical ensemble is considered, the thermodynamic properties of gases and the relationship between macroscopic and microscopic parameters of the system are analyzed. A statistical approach is being developed to describe the thermodynamic properties of gases using entropy based on the methods of statistical physics. The results of the study can be used to develop methods for calculating the energy and kinetic properties of gases.

Keywords: gas, entropy, entropy properties, canonical ensemble, statistical approach, thermodynamic process

References

1. Pathria R. K., Beale Paul D. The canonical ensemble // Statistical Mechanics. — Elsevier, 2022. — P. 39–91. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-102692-2.00012-0>.
2. Entropy and canonical ensemble of hybrid quantum classical systems / J. L. Alonso [et al.] // Physical Review E. — 2020. — oct. — Vol. 102, no. 4. — P. 042118. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVE.102.042118>.
3. Ptaszynski Krzysztof, Esposito Massimiliano. Ensemble dependence of information-theoretic contributions to the entropy production // Physical Review E. — 2023. — may. — Vol. 107, no. 5. — P. 052102. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.107.L052102>.
4. Comparison of canonical and microcanonical definitions of entropy / Michael Matty [et al.] // Physica A: statistical mechanics and its applications. — 2017. — feb. — Vol. 467. — P. 474–489. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.PHYSA.2016.10.030>.
5. Sekerka Robert F. Classical canonical ensemble // Thermal Physics. — Elsevier, 2015. — P. 337–358. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803304-3.00020-X>.

6. Griffin William, Matty Michael, Swendsen Robert H. Finite thermal reservoirs and the canonical distribution // *Physica A: statistical mechanics and its applications*. — 2017. — oct. — Vol. 484. — P. 1–10. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.PHYSA.2017.04.143>.
7. Canonical ensemble ground state and correlation entropy of Bose-Einstein condensate / Anatoly Svidzinsky [et al.] // *New Journal of Physics*. — 2018. — jan. — Vol. 20, no. 1. — P. 013002. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/AA910A>.
8. Sekerka Robert F. Entropy for any ensemble // *Thermal Physics*. — Elsevier, 2015. — P. 397–403. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803304-3.00022-3>.
9. Stephanos Joseph J., Addison Anthony W. Canonical ensemble // *Chemical thermodynamics and statistical aspects*. — Elsevier, 2023. — P. 643–670. — ISBN: 9780443152955. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-443-15295-5.00004-1>.
10. Baeten Maarten, Naudts Jan. On the thermodynamics of classical micro-canonical systems // *Entropy*. — 2011. — jun. — Vol. 13, no. 6. — P. 1186–1199. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/E13061186>.
11. Prestipino Santi, Giaquinta Paolo V. Statistical entropy of a lattice-gas model: multi-particle correlation expansion // *Journal of Statistical Physics*. — 2000. — Vol. 98, no. 1/2. — P. 507–509. — URL: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1018603728546>.
12. Meirovitch Hagai. A Monte Carlo study of the entropy, the pressure, and the critical behavior of the hard-square lattice gas // *Journal of Statistical Physics*. — 1983. — mar. — Vol. 30, no. 3. — P. 681–698. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01009683>.

Information about authors:

Irina Aleksandrovna Malova — student of the Faculty of Physical and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: ira.malova.02@mail.ru

ORCID iD  0009-0009-2279-7632

Web of Science ResearcherID  JRW-5338-2023

Авторский указатель

Алиева, Р. Р., 1, 21
Алгунин, К. К., 1, 21, 41
Железникова, Е. С., 56
Захарова, О. Н., 72

Малова, И. А., 88
Соколова, В. В., 56
Сорокина, Е. С., 41

Author's index

Alieva, R. R., 1, 21
Altunin, K. K., 1, 21, 41

Malova, I. A., 88

Sokolova, V. V., 56
Sorokina, E. S., 41

Zakharova, O. N., 72
Zheleznikova, E. S., 56

