ISSN 2712-8326



НАУКА ONLINE
SCIENCE ONLINE

Сетевое издание
№ 3 (36)| 2026

http://nauka-online.ru/

НАУКА ONLINE, № 3 (36), 2026.

Сетевое издание «НАУКА ONLINE» зарегистрировано как средство массовой информации в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер: серия Эл № ФС77-75253; дата принятия решения: 01 апреля 2019 г.).

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: 432000, Ульяновская область, город Ульяновск, площадь Ленина, зд. 4/5.

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

Адрес издателя: 432000, Ульяновская область, город Ульяновск, площадь Ленина, зд. 4/5.

Главный редактор: К. К. Алтунин.

Адрес редакции: Россия, 432000, Ульяновская область, город Ульяновск, площадь Ленина, зд. 4/5.

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

E-mail: nauka_online@ulspu.ru

Science online, issue 3 (36), 2026.

The online publication “Science Online” is registered as a mass media outlet with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (registration number: series El No. FS77-75253; date of decision: April 1, 2019).

ISSN 2712-8326

Published 4 times a year.

Founder: Ulyanovsk State Pedagogical University.

The address of the founder is 432000, Ulyanovsk region, Ulyanovsk city, Lenin square, 4/5.

Publisher: Ulyanovsk State Pedagogical University.

The address of the publisher is 432000, Ulyanovsk region, Ulyanovsk city, Lenin square, 4/5.

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

Editorial office address: Russia, 432000, 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.

Веселовская Юлия Александровна, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры методик математического и информационно-технологического образования, декан факультета физико-математического и технологического образования 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, доцент кафедры методик математического и информационно-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, доцент, доцент кафедры биологии и химии ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», город Ульяновск, Российская Федерация.

Цыганов Андрей Владимирович, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики, заведующий научно-исследовательской лабораторией математического моделирования 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, доктор технических наук, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», город Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Шишкарев 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.

Yulia Aleksandrovna Veselovskaya, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "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, Associate Professor the Department of Methods of Mathematical and Information Technology Education, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "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, 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.

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, Doctor of Technical 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 гиперболического метаматериала для оптического спектрального диапазона
К. К. Алтунин

Науки об образовании 55

Теория и методика обучения и воспитания 55

55 Разработка курса по компьютерному моделированию квантовых систем пониженной размерности в системе управления обучением MOODLE
Е. А. Илюшкина

76 Разработка дистанционного курса по гибридной наноплазмонике
В. Д. Однакова

98 Разработка дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем
З. А. Толянина

114 Разработка дистанционного курса топологической фотоники
Э. А. Юсифова

135 Организация проектной деятельности учащихся основной школы при изучении основ аэродинамики беспилотных летательных аппаратов
Д. В. Ярынкин

Авторский указатель 150

CONTENTS

Physical sciences **1**

Optics 1

1 Investigation of the optical properties of a hyperbolic metamaterial for the optical spectral range
K. K. Altunin

Educational sciences **55**

Theory and methodology of training and education 55

55 Development of a course on the computer modeling of low-dimensional quantum systems within the learning management system MOODLE
E. A. Ilyushkina

76 Development of a distance learning course on hybrid nanoplasmonics
V. D. Odnakova

98 Development of a distance learning course on the theoretical physics of mesoscopic systems
Z. A. Tolyanina

114 Development of a distance learning course on topological photonics
E. A. Yusifova

135 Organizing project work on the fundamentals of unmanned aerial vehicle aerodynamics
D. V. Yarynkin

Author's index 151

Секция 1

Физические науки

1.1 Оптика

Научная статья
УДК 535.3
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 1.3.6.
PACS 42.25.Bs
OCIS 160.3918
MSC 78A25

Исследование оптических свойств гиперболического метаматериала для оптического спектрального диапазона

К. К. Алтунин [1]

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432000, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 8 июля 2026 года
После переработки 10 июля 2026 года
Опубликована 30 сентября 2026 года

Аннотация. Представлены результаты теоретического и численного исследования оптических свойств гиперболического метаматериала для оптического спектрального диапазона. Гиперболические метаматериалы представляют собой класс анизотропных сред, у которых одна или две главные компоненты тензора диэлектрической проницаемости имеют знак, противоположный остальным. Разработана модель гиперболических метаматериалов, учитывающая анизотропию, диссипацию и пространственную дисперсию, на основе которой получены аналитические выражения для тензора диэлектрической проницаемости, дисперсионных соотношений. Разработана численная модель оптических процессов в плёнках из гиперболического метаматериала, основанная на приближении Максвелл–Гарнетта. Проведены численные расчёты эффективных параметров среды таких, как показатель преломления, поверхностный импеданс, коэффициентов оптического отражения, пропускания, поглощения, подтвердившее корректность аналитических результатов. Показано, что гиперболические метаматериалы обладают сильным локальным усилением поля.

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

Ключевые слова: анизотропия, оптические свойства, плоская электромагнитная волна, метаматериал, гиперболический метаматериал, нанофотоника, коэффициент отражения, коэффициент пропускания, приближение эффективной среды, локальное усиление поля

Введение

Актуальность исследования обусловлена интенсивным развитием нанофотоники и метаматериалов, открывающих пути к управлению светом на субволновых масштабах, недоступных для обычных диэлектриков и металлов. Гиперболические метаматериалы представляют собой класс анизотропных сред, у которых одна или две главные компоненты тензора диэлектрической проницаемости имеют знак, противоположный остальным.

Целью работы является исследование зависимостей коэффициентов отражения и пропускания для плоской электромагнитной волны, падающей из вакуума на плоскую границу раздела с полубесконечным гиперболическим метаматериалом.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи. Во-первых, необходимо написать обзор научной литературы по исследованию гиперболических метаматериалов. Во-вторых, требуется решить граничную задачу для распространения электромагнитных волн в одноосном гиперболическом метаматериале, учитывая возможную комплексность компонент тензора $\hat{\varepsilon}$ для описания потерь, то есть найти амплитуды отражённой и прошедшей волн, удовлетворив условиям непрерывности тангенциальных компонент полей $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ на границе раздела. В-третьих, необходимо провести параметрический анализ полученных коэффициентов Френеля в зависимости от угла падения, поляризации и соотношения между $\varepsilon_\perp$ и $\varepsilon_\parallel$.

Объектом научного исследования является полубесконечное однородное анизотропное полупространство, характеризуемое тензором диэлектрической проницаемости для гиперболического метаматериала. Предметом научного исследования выступают энергетические коэффициенты оптического отражения R и пропускания T, а также фазы отражённой и прошедшей волн для плёнки из гиперболического метаматериала.

Гипотеза научного исследования заключается в том, что уникальные дисперсионные свойства гиперболических метаматериалов, обусловленные гиперболической формой изочастотной поверхности, приводят к качественно новым, по сравнению с обычными средами, режимам оптического отражения и пропускания, включая эффекты отрицательного рефракции, резкой угловой селективности и усиления ближнего поля.

В рамках работы применяются следующие методы исследования такие, как аналитические методы решения уравнений Максвелла для анизотропной среды, метод стационарной фазы для анализа распространения ограниченных пучков через границу раздела сред, методы численного моделирования с учётом диссипации и анализа устойчивости решений путём сканирования параметров $\varepsilon_\perp$ и $\varepsilon_\parallel$ в комплексной плоскости. Материалами исследования служат модельные диэлектрические проницаемости, описывающие два основных типа гиперболических метаматериалов.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые в явном виде получены и проанализированы амплитудные и энергетические коэффициенты оптического отражения и пропускания для полубесконечного гиперболического метаматериала с учётом произвольной ориентации оптической оси; обнаружены и классифицированы новые угловые эффекты, аналогичные эффекту Брюстера, но возникающие вследствие гиперболической дисперсии, а не из-за равенства импедансов; показано существование режимов, когда полное внутреннее отражение происходит не со стороны оптически более плотной, а со стороны оптически менее плотной среды, что является следствием

анизотропии гиперболического метаматериала.

Теоретическая значимость научного исследования заключается в обобщении классической теории Френеля на случай сред с неопределённым тензором диэлектрической проницаемости, что расширяет аппарат электродинамики сплошных сред. Практическая значимость связана с потенциальным применением результатов для проектирования новых оптических устройств, таких как гиперлинзы, преодолевающие дифракционный предел, планарные концентраторы света и высокоэффективные сенсорные платформы.

Обзор физических свойств гиперболических метаматериалов

Гиперболические метаматериалы представляют собой уникальный класс искусственных электромагнитных сред, характеризующихся крайней анизотропией в тензоре диэлектрической проницаемости, что приводит к гиперболическим дисперсионным соотношениям, а не к эллиптической дисперсии, наблюдаемой в обычных материалах @auxrussian@auxenglish[1]. Гиперболические метаматериалы привлекли значительное внимание благодаря своей способности поддерживать распространяющиеся волны с очень большими волновыми векторами, что позволяет создавать новые оптические явления и приложения. Гиперболические метаматериалы — это одноосные анизотропные среды, в которых главные компоненты тензора диэлектрической проницаемости имеют противоположные знаки. Для одноосного материала с компонентами тензора диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\parallel}$ (параллельными оптической оси) и $\varepsilon_{\perp}$ (перпендикулярными оптической оси) гиперболическая дисперсия возникает, когда $\varepsilon_{\parallel}\varepsilon_{\perp} < 0$ [1, 2]. Это условие приводит к гиперболической изочастотной поверхности, описываемой уравнением:

$$\frac{k_{\perp}^2}{\varepsilon_{\parallel}} + \frac{k_{\parallel}^2}{\varepsilon_{\perp}} = \frac{\omega^2}{c^2} \ , \tag{1}$$

где $k_{\perp}$ и $k_{\parallel}$ – компоненты волнового вектора, перпендикулярные и параллельные оптической оси соответственно [1, 2].

Существует два основных типа гиперболической дисперсии в гиперболических метаматериалах: гиперболические метаматериалы первого типа: $\varepsilon_{\parallel} > 0$ и $\varepsilon_{\perp} < 0$, гиперболические метаматериалы второго типа: $\varepsilon_{\parallel} < 0$ и $\varepsilon_{\perp} > 0$. Гиперболическая дисперсия обеспечивает распространение волн с произвольно большими волновыми векторами, поддерживая высокодиэлектрические моды, которые являются эванесцентными в обычных материалах [2, 3].

Первый тип гиперболических метаматериалов — это однополосный гиперболический метаматериал, для которого $\mathrm{Re}(\varepsilon_{\perp}) > 0$, $\mathrm{Re}(\varepsilon_{\parallel}) < 0$, а второй тип — двухполосный гиперболический метаматериал, где $\mathrm{Re}(\varepsilon_{\perp}) < 0$, $\mathrm{Re}(\varepsilon_{\parallel}) > 0$. Для описания потерь используются модели Друде или Лоренца:

$$\varepsilon_{\alpha}(\omega) = \varepsilon_{\infty,\alpha} - \frac{\omega_{p,\alpha}^2}{\omega(\omega + i\gamma_{\alpha})} \ , \quad \alpha = \perp, \parallel, \tag{2}$$

или

$$\varepsilon_{\alpha}(\omega) = \varepsilon_{\infty,\alpha} + \frac{\omega_{p,\alpha}^2}{\omega_{0,\alpha}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_{\alpha}} \ . \tag{3}$$

Гиперболические метаматериалы могут быть реализованы в виде многослойных структур из чередующихся слоёв металла и диэлектрических материалов, создающих эффективную гиперболическую дисперсию, когда толщина слоя значительно меньше рабочей длины волны. К распространенным комбинациям материалов относятся нано-

композиты Ag/TiO_2, Au/Al_2O_3 и Ag/Si [3, 4]. Компоненты тензора эффективной диэлектрической проницаемости задаются формулой:

$$\varepsilon_{\parallel} = f\varepsilon_m + (1-f)\varepsilon_d \,, \tag{4}$$

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{f\varepsilon_d + (1-f)\varepsilon_m} \,, \tag{5}$$

где f – доля заполнения металлом, а ε_m и ε_d – диэлектрические проницаемости металла и диэлектрика соответственно [3].

Гиперболические метаматериалы могут быть реализованы в виде массивов нанопроводов из вертикально ориентированных металлических нанопроводов, внедрённых в диэлектрическую матрицу, которые обладают гиперболическими свойствами. Диаметр и расстояние между нанопроводами должны быть меньше длины волны для достижения эффективного поведения среды [2, 4].

Гиперболические метаматериалы могут быть реализованы в виде переходных гиперболических метаматериалов с использованием полупроводников, таких как InAsSb, где гиперболические свойства могут динамически контролироваться [5].

Наиболее отличительной особенностью гиперболических метаматериалов является их способность поддерживать распространяющиеся волны с очень большими волновыми векторами (волны с высоким k), которые обычно являются эванесцентными в обычных материалах [1, 2]. Это позволяет получать изображения с субволновой длиной волны и фокусироваться за пределами дифракционного предела.

Гиперболические метаматериалы демонстрируют расходящуюся фотонную плотность состояний из-за неограниченного характера их изочастотной поверхности. Это приводит к увеличению скорости спонтанного излучения и факторов Пурселла для квантовых излучателей, расположенных вблизи гиперболических метаматериалов [2, 3].

В зависимости от ориентации и типа гиперболической дисперсии, гиперболические метаматериалы могут демонстрировать отрицательное преломление, при котором падающие и преломленные волны лежат по одну сторону от нормали [1, 4].

На малых масштабах длины излучения, сопоставимых с размером элементарной ячейки, нелокальные эффекты становятся значительными в гиперболических метаматериалах. Эти эффекты регуляризуют теоретически бесконечную плотность состояний и изменяют оптический отклик [6].

Гиперболические метаматериалы позволяют разрабатывать гиперлинзы, способные разрешать объекты меньше дифракционного предела. Преобразуя эванесцентные волны в распространяющиеся волны, гиперлинзы на основе гиперболических метаматериалов могут достигать субволнового разрешения в дальней зоне [2, 4, 7].

Усиленная плотность фотонных состояний в гиперболических метаматериалах приводит к применению в усиленном спонтанном излучении и флуоресценции, источниках одиночных фотонов, обработке квантовой информации, усилении нелинейной оптики [2, 3, 8].

Современные гиперболические метаматериалы обеспечивают повышенную чувствительность для биосенсорных приложений благодаря их способности концентрировать электромагнитные поля в субволновых масштабах. Это позволяет обнаруживать мельчайшие количества биологических молекул [2, 4].

Гиперболические метаматериалы могут изменять радиационный теплообмен в ближнем поле, что позволяет использовать их в системах теплоотведения, сбора энергии и термофотовольтаике [1, 3].

Волноводы из гиперболических метаматериалов поддерживают сильно локализованные моды с низкими потерями на распространение, что делает их привлекательными для интегрированных фотонных схем и оптических межсоединений на кристалле [7].

Исследования сосредоточены на разработке активных гиперболических метаматериалов, свойства которых можно динамически настраивать с помощью внешних воздействий, таких как электрические поля, оптическая накачка или изменения температуры [9]. В статье [9] было показано, что гиперболические метаматериалы с компенсацией потерь, включающие усиливающие среды, позволяют преодолеть внутренние потери поглощения.

Нелинейные гиперболические метаматериалы и структуры из метаматериалов демонстрируют усиленные нелинейные оптические отклики благодаря усилению поля и модифицированным условиям фазового согласования, что позволяет использовать их в преобразовании частоты и полностью оптической обработке сигналов [1, 8].

Переход от эллиптической к гиперболической дисперсии представляет собой топологическое изменение на изочастотной поверхности, приводящее к резким изменениям оптических свойств, которые можно использовать для создания новых устройств [7].

Ключевые проблемы включают минимизацию оптических потерь, достижение широкополосной работы и масштабирование процессов изготовления для практических применений. Нелокальные эффекты и пространственная дисперсия также должны быть тщательно учтены при проектировании [6].

Гиперболические метаматериалы — это материалы, в которых по крайней мере одна главная диэлектрическая постоянная отрицательна. В статье [10] описывается поверхность показателя преломления и результирующие эффекты преломления для двуосного гиперболического метаматериала с главными диэлектрическими постоянными $\varepsilon_1 < 0$, $0 < \varepsilon_2 \neq \varepsilon_3$. В этом общем случае два слоя поверхности показателя преломления пересекаются, образуя конические сингулярности. В статье [10] выводится лучевое описание конического преломления в этих материалах и показываем, что оно топологически и количественно отличается от конического преломления в обычном двуосном материале. В статье [10] также разрабатывается описание волновой оптики, которое позволяет получать дифракционные картины, образующиеся от произвольных пучков, падающих близко к оптической оси. В статье [10] показано, что полученные картины не обладают круговой симметрией и, следовательно, качественно отличаются от картин, полученных в обычных материалах с положительным показателем преломления.

В статье [11] сообщается о результатах разработки и экспериментальной характеристике широкополосного акустического гиперболического метаматериала. В статье [11] предложенный метаматериал состоит из множества массивов зажатых тонких пластин, обращённых в направлении y, и, как показано, обеспечивает противоположные знаки эффективной плотности в направлениях x и y ниже определённой частоты отсечки, что приводит к гиперболической дисперсии. Экспериментально продемонстрированы частичная фокусировка и субволновое изображение на частотах от 1.0 кГц до 2.5 кГц. Предложенный метаматериал может открыть новые возможности для управления акустическими волнами и может найти применение в медицинской визуализации и неразрушающем контроле.

Взаимодействие света и материи в наномасштабе в режиме слабой связи было достигнуто с помощью уникальных гиперболических метаматериальных мод, обладающих высокой плотностью состояний. В статье [12] демонстрируется сильная связь между межподзонными переходами многослойной квантово-ямочной пластины и объёмными поляритонными модами гиперболического метаматериала. Эти гиперболические метаматериальные моды имеют большие волновые векторы (моды с высоким k-значением) и обычно эванесцентны в обычных материалах. В статье [12] анализируется практическая многослойная гиперболическая метаматериальная структура металл-диэлектрик, состоящая из сильно легированного полупроводника, выступающего в качестве металлического слоя, и активной многослойной квантово-ямочной диэлектрической пласти-

ны. В статье [12] наблюдается делокализованное взаимодействие мод метаматериала с активными материалами, распределенными по всей структуре. В статье [12] предсказывается сильная связь и характерное антипересечение с максимальной энергией расщепления Раби до 52 мэВ между модой с высоким k-значением гиперболического метаматериала и межподзонным переходом, что примерно в 10.5 раз больше ширины линии межподзонного перехода и в 4.5 раза больше потерь материала структуры. Масштабируемость и возможность регулирования энергии расщепления Раби в активном полупроводниковом метаматериальном устройстве открывают потенциальные возможности применения в инфракрасных фотодетекторах на основе квантовых ям и межподзонных светоизлучающих устройствах.

В статье [13] предложен новый физический механизм проектирования квантовых гиперболических метаматериалов с использованием полупроводниковых брэгговских зеркал, содержащих периодически расположенные квантовые ямы. Гиперболическая дисперсия экситон-поляритонных мод реализуется вблизи вершины первой разрешённой фотонной минизоны в такой структуре, что приводит к образованию экситон-поляритонных волн. Экситон-световая связь обеспечивает резонансную нелинейность, которая приводит к нетривиальным топологическим решениям. В статье [13] предсказывается образование пространственно локализованных осцилляционных структур низкой амплитуды: осциллонов, описываемых решениями в форме излома эффективного уравнения Гинзбурга-Ландау-Хиггса. Эти осциллоны имеют прямые аналогии в теории гравитации. В статье [13] обсуждается применение экситон-поляритонных полей Хиггса для генерации состояния кота Шрёдингера.

Ограничение распространения света на субволновом уровне в нелинейных гиперболических метаматериалах за счёт образования пространственных солитонов в последнее время привлекает большое внимание из-за своего, казалось бы, неинтуитивного поведения. Для достижения самофокусировки в гиперболической проволочной среде необходимо использовать нелинейную самодефокусирующую среду Керра в качестве диэлектрической основы. В статье [14] демонстрируется, что это поведение находит естественное объяснение в терминах аналога гравитации. Волновое уравнение, описывающее распространение необычного света внутри гиперболических метаматериалов, демонстрирует $(2+1)$-мерную симметрию Лоренца. Роль времени в соответствующем эффективном трёхмерном пространстве-времени Минковского играет пространственная координата, выровненная с оптической осью метаматериала. Нелинейный оптический эффект Керра «искривляет» это пространство-время, что приводит к эффективной гравитационной силе между необычными фотонами. Для того чтобы эффективная гравитационная постоянная была положительной, необходимо использовать отрицательную самодефокусирующую среду Керра в качестве основы. Если гравитационное самовзаимодействие достаточно сильное, пространственный солитон может коллапсировать в аналог чёрной дыры.

Оптические силы представляют собой фундаментальное явление, важное в различных областях науки, от астрономии до биологии. Как правило, для достижения измеримых эффектов, пригодных для практического применения, требуются интенсивные внешние источники излучения. В статье [15] демонстрируется, что квантовые излучатели, помещенные в однородную анизотропную среду, индуцируют собственные крутящие моменты, выравниваясь в чётко определённом направлении, заданном анизотропией, с целью максимизации эффективности излучения. В статье [15] разрабатывается универсальная квантовомеханическая теория самоиндуцированных крутящих моментов, действующих на излучатель, помещенный в материальную среду. В статье [15] теоретическая основа базируется на подходе реакции излучения с использованием строгой локальной квантизации Ланжевена электромагнитных возбуждений. В статье [15] по-

казано увеличение собственного крутящего момента более чем на два порядка в анизотропном метаматериале с гиперболической дисперсией, имеющем отрицательное отношение компонент тензора диэлектрической проницаемости, по сравнению с обычными анизотропными кристаллами с наивысшей доступной в природе анизотропией.

В статье [16] исследуется сила Казимира между двумя гиперболическими метаматериалами, построенными из чередующихся слоёв металл-диэлектрик. Благодаря наличию гиперболической дисперсии электромагнитный отклик гиперболических метаматериалов становится чрезвычайно резким, что проявляется в почти полном отражении в этом частотном диапазоне. В результате сила Казимира между гиперболическими метаматериалами значительно больше, чем между обычными диэлектриками. Кроме того, в статье [16] показано, что сила Казимира пропорциональна ширине полосы пропускания этой гиперболической дисперсии, которая зависит от коэффициента заполнения, а также от характеристических частот составляющих материалов. Поэтому обсуждаются соотношения между силой и этими параметрами. В статье [16] показано, что силу Казимира можно контролировать, регулируя ширину полосы пропускания, обладающей гиперболической дисперсией структур. Работа [16] открывает перспективные возможности применения гиперболических метаматериалов в микроэлектромеханических и наноэлектромеханических системах.

Управление механическим движением наночастиц является ценной функцией, востребованной в различных междисциплинарных приложениях, например, в биофизике, и обычно достигается с помощью оптических сил. В статье [17] показано, что гиперболические метаматериалы позволяют настраивать и усиливать электромагнитное рассеяние и, как следствие, предоставляют платформу для нового типа оптических манипуляций. В статье [17] были предсказаны и проанализированы оптические силы притяжения, действующие на небольшую частицу, помещенную внутрь пластины из гиперболического метаматериала. Для притяжения частиц к источнику света возбуждались сильно локализованные необычные моды гиперболического метаматериала посредством рассеяния от дефекта, расположенного на границе раздела пластины. Этот тип структурированного освещения в сочетании с замечательными свойствами рассеяния, вдохновлёнными гиперболической дисперсией в метаматериале, создаёт оптическое притяжение. В статье [17] были исследованы силы, действующие на диэлектрические частицы с высоким и низким показателем преломления, а также на золотые частицы, и было показано, что эффект притяжения возникает во всех случаях. Возможность управлять механическим движением в наномасштабе с помощью вспомогательных фотонных структур открывает путь к исследованию различных явлений, например, биохимических реакций, молекулярной динамики и многого другого.

Динамика излучения оптических излучателей может управляться путём правильного проектирования материальных структур, изменяющих локальную плотность фотонных состояний, — явление, часто называемое эффектом Пурселла. Считается, что плазмонные наностержневые метаматериалы с гиперболической дисперсией электромагнитных мод обеспечивают значительное усиление эффекта Пурселла как в широкополосном, так и в нерезонансном режимах. В статье [18] исследованы резонаторы конечного размера, образованные наностержневыми метаматериалами, и показали, что основной механизм эффекта Пурселла в таких резонаторах обусловлен поддерживаемыми гиперболическими модами, которые возникают из взаимодействующих цилиндрических поверхностных плазмонных мод конечного числа наностержней, образующих резонатор. Факторы Пурселла, создаваемые этими модами резонатора, достигают нескольких сотен, что до 5 раз больше, чем в режиме ϵ-близкого к нулю. В статье [18] показано, что в то время как фактор Пурселла, создаваемый модами Фабри-Перо, зависит от размера резонатора, скорость затухания в режиме ϵ-близкого к нулю практически не за-

висит от геометрии. В статье [18] представленный анализ демонстрирует возможность управления эмиссионными свойствами структурированных метаматериалов с учётом их внутреннего состава.

В последнее время большое внимание уделяется возможности достижения односторонней, невосприимчивой к обратному рассеянию передачи света путём имитации топологических свойств некоторых твердотельных систем, таких как топологические изоляторы. Однако до сих пор демонстрации нетривиальной топологии в фотонике основывались на фотонных кристаллах с точно спроектированными решётчатыми структурами, периодическими в масштабе рабочей длины волны и состоящими из тонко настроенных сложных материалов. В статье [19] предложен новый подход с использованием эффективной среды для достижения топологически защищенных фотонных поверхностных состояний, устойчивых к беспорядку во всех масштабах длин и для широкого диапазона параметров материала. Примечательно, что нетривиальная топология нашей метаматериальной конструкции является результатом кривизны Берри, возникающей из-за поперечности электромагнитных волн в однородной среде. Таким образом, в статье [19] результаты исследования помогают преодолеть разрыв между развивающейся областью топологической зонной теории и классическими оптическими явлениями, такими как спиновый эффект Холла света. Путь эффективной среды к топологическим фазам откроет путь к высококомпактной односторонней передаче электромагнитных волн в интегрированных фотонных схемах.

В статье [20] изучается теплообмен в ближнем поле между гиперболическими материалами и демонстрируем, что эти среды способны поддерживать широкополосные фрустрированные моды, которые переносят тепло посредством фотонного туннелирования с высокой эффективностью, близкой к теоретическому пределу. В статье [20] предсказывается, что гиперболические материалы могут быть спроектированы как идеальные тепловые излучатели в наномасштабе, и выводим верхний предел для теплового потока, обусловленного гиперболическими модами.

Гиперболические метаматериалы поддерживают распространение волн с произвольно большими волновыми векторами в широком спектральном диапазоне и обладают уникальной ценностью для управления радиационным тепловым переносом в ближнем поле. В статье [21], используя рациональный подход к проектированию, основанный на локальной электромагнитной плотности состояний, демонстрируется способность гиперболических метаматериалов существенно выпрямлять радиационный тепловой поток. В статье [21] идея заключается в создании сценария с прямым смещением, в котором два вывода теплового диода на основе гиперболических метаматериалов имеют перекрывающиеся гиперболические полосы, что приводит к большому тепловому потоку, и подавлении обратного теплового потока путём создания спектрально несовпадающей плотности состояний при изменении температурного смещения. В качестве примера в статье [21] представлены несколько высокоэффективных тепловых диодов, созданных путём объединения гиперболических метаматериалов, изготовленных из полярных диэлектриков и материалов с переходом металл-изолятор, в виде периодических массивов нанопроволок, и рассматриваем три репрезентативных типа подложек. В статье [21] после оптимизации теоретически достигаем коэффициента выпрямления 324 при зазоре 100 нм, который остается выше 148 для больших размеров зазора до 1 мкм в широком диапазоне температур. Максимальное выпрямление представляет собой почти 1000-кратное увеличение по сравнению с объемным диодом, использующим те же материалы, и вдвое превышает показатели современных конструкций. В статье [21] подчёркивается потенциал гиперболических метаматериалов для выпрямления радиационного теплового потока и может найти применение в передовых системах терморегулирования и преобразования энергии.

В статье [22] теоретически исследуется резкое усиление спонтанного излучения в метаматериалах с гиперболической дисперсией, смоделированной как кубическая решётка анизотропных резонансных диполей. В статье [22] анализируется зависимость фактора Пурселла от положения источника в элементарной ячейке решётки и демонстрируем, что оптимальные положения излучателей, необходимые для достижения больших факторов Пурселла и сдвигов Лэмба, находятся в локальных максимумах поля. В статье [22] показано, что рассчитанная функция Грина имеет характерную крестообразную форму, пространственно модулированную из-за структурной дискретности. В статье [22] показано, что базовая микроскопическая теория даёт фундаментальное понимание быстро развивающейся области гиперболических метаматериалов.

В статье [23] изучается рассеяние поляритонов свободными электронами в гиперболических фотонных средах и демонстрируем, что нетрадиционная дисперсия и высокая локальная плотность состояний электромагнитных мод в композитных средах с гиперболической дисперсией могут приводить к гигантскому комптоновскому сдвигу и резкому увеличению сечения рассеяния. В статье [23] разрабатывается универсальный подход к изучению многофотонных процессов в наноструктурированных средах и выводим спектр интенсивности рассеянного излучения для реалистичных метаматериальных структур.

В статье [24] демонстрируется, что использование полевого эффекта позволяет настраивать эффективные оптические параметры слоистого гиперболического метаматериала на оптических частотах. Электрическая модуляция диэлектрической проницаемости в прозрачных проводящих оксидах осуществляется за счёт изменения плотности носителей заряда. В статье [24] показано, что эти изменения диэлектрической проницаемости приводят к активной модуляции эффективных электромагнитных параметров, а также к активному управлению анизотропной дисперсионной поверхностью гиперболических метаматериалов и позволяют открывать и закрывать фотонные запрещённые зоны. Возможность регулирования эффективной электрической диэлектрической проницаемости и магнитной проницаемости также приводит к топологическим переходам в характеристиках оптической дисперсии.

В статье [25] предлагаются метаматериалы для терагерцовых частот на основе многослойных графеновых структур. В статье [25] рассчитывается тензор диэлектрической проницаемости эффективной нелокальной среды с периодическим расположением графеновых слоёв и демонстрируем, что настройка от эллиптической до гиперболической дисперсии может быть достигнута с помощью внешнего управляющего напряжения. В статье [25] показано, что такие графеновые структуры могут демонстрировать гигантский эффект Пурселла, который может быть использован для усиления терагерцового излучения в полупроводниковых устройствах. Возможность настройки этих структур может быть дополнительно улучшена с помощью внешнего магнитного поля, что приводит к нетрадиционной гибридизации TE-поляризованных и TM-поляризованных волн.

В статье [26] предлагается аналитический подход к расчёту гомогенизированных диэлектрических функций $\varepsilon_{\parallel}(\omega)$ и $\varepsilon_{\perp}(\omega)$ одномерной периодической металл-диэлектрической структуры. В статье [26] показано, что полученные формулы действительны на высоких частотах вблизи точек топологического перехода из эллиптического в гиперболический режим. В статье [26] предложенный метод высокочастотной гомогенизации учитывает быстро изменяющиеся электромагнитные поля внутри металлической компоненты элементарной ячейки, в частности, эванесцентный характер плазмонной моды и осциллирующее поведение волноводоподобных мод. В статье [26] результаты показывают хорошее соответствие точному решению дисперсионного уравнения Ритова и значительное отклонение от широко используемых квазистатических формул, полученных пространственным усреднением по направлению периодичности z функций $\varepsilon(z)$ и

$1/\varepsilon(z)$. Квазистатический подход игнорирует зависимость полей от z, что приводит к его ограниченной применимости вблизи частоты топологического перехода.

В статье [27] показано, что аксиальная компонента тензора магнитной проницаемости находится в резонансе для проволочной среды, состоящей из нанопроводов с высоким показателем преломления и положительным значением диэлектрической проницаемости, и её действительная часть меняет знак на определённой частоте. На этой частоте среда испытывает топологический фазовый переход между эллиптической и гиперболической дисперсией. В статье [27] показано, что переходный режим характеризуется чрезвычайно сильной зависимостью проницаемости от волнового вектора. Это подразумевает очень высокую плотность электромагнитных состояний, что приводит к нитевидному рисунку и заметному фактору Пурселла для поперечно ориентированного магнитного диполя.

В статье [28] встраивается гиперболический метаматериал на основе многослойных пар эпитаксиально выращенных ZnO/ZnO:Ga в монолитную оптическую микрорезонаторную структуру и экспериментально и теоретически исследуется возникающие уникальные резонансные эффекты. В отличие от традиционных металлов, полупроводниковый подход позволяет использовать все три области диэлектрической проницаемости гиперболического метаматериала в ближнем инфракрасном диапазоне спектра. В статье [28] такая конфигурация приводит к появлению мод одинакового порядка на разных частотах, резонанса нулевого порядка в области с положительной диэлектрической проницаемостью и континуума мод высокого порядка. Кроме того, в статье [28] в спектр мод резонатора вводится необычная нижняя частота отсечки. Наблюдаемые эффекты расширяют возможности для индивидуальной настройки оптических резонаторов; в частности, моды нулевого и высокого порядка обладают большим потенциалом для создания резонаторов значительно меньшего размера, чем длина волны.

В статье [29] предложена концепция гиперболических проводов, которые преодолевают существующие ограничения патч-антенн типа металл-изолятор-металл с точки зрения электромагнитной локализации и эффективности. Использование гиперболических метаматериалов позволяет создавать миниатюрные резонаторы, поддерживающие объемные плазмонные поляритоны, сжатые до одной сотой длины волны. Помимо этого десятикратного уменьшения размеров по сравнению с антеннами типа металл-изолятор-металл, в статье [29] предлагается модель, позволяющая масштабировать резонансные частоты гиперболических проводов в широком спектральном диапазоне путём контроля степени заполнения металлами и диэлектриками.

Управление распространением света с помощью искусственных фотонных кристаллов и электромагнитных метаматериалов является важной темой в динамично развивающейся области фотоники. В частности, хиральные краевые состояния на поверхности или на границе раздела фотонных изоляторов Черна могут быть использованы для создания волноводов без отражений. В статье [30], с помощью теоретического анализа и электромагнитного моделирования, демонстрируется, что гиромагнитные гиперболические метаматериалы являются фотонными изоляторами Черна с превосходными свойствами. В статье [30] показано, что одновременное возникновение гиперболического и гиромагнитного эффектов в этих метаматериалах открывает большие топологические запрещенные зоны с числом Черна, равным единице. Важно отметить, что гиромагнитные гиперболические метаматериалы-изоляторы Черна обладают нерадиационными хиральными краевыми модами на своих поверхностях, что позволяет нам изготавливать однонаправленные волноводы без металлических оболочек, которые обычно приводят к значительным омическим потерям. Кроме того, фотонные краевые состояния в предлагаемых изоляторах Черна устойчивы к нарушениям порядка в широком диапазоне масштабов длин, что резко контрастирует с кристаллическими топологическими изоля-

торами, а направление светового потока на поверхности изоляторов Черна можно легко изменить, переключив направление приложенного магнитного поля. Примечательно, что в статье [30] обнаружено отрицательное преломление топологической поверхностной волны на границе между гиромагнитными гиперболическими метаматериалами с противоположными знаками гиромагнитных параметров. Наконец, в статье [30] показано, что по сравнению с другими фотонными топологическими материалами, такими как хиральные гиперболические материалы, предлагаемые гиромагнитные гиперболические метаматериалы — изоляторы Черна — гораздо проще изготавливать.

В статье [31] представлена возможность создания резонансов Фано с использованием многослойных гиперболических метаматериалов. В статье [31] предложенные конструкции резонаторов состоят из многослойных структур с центральной наклонной частью. В статье [31] показано, что высокорегулируемые резонансы возникают в результате интерференции между распространяющейся и эванесцентной модами внутри наклонной секции. Распространяющаяся мода может достигать чрезвычайно высокого эффективного показателя преломления, что позволяет создавать резонаторы размером до 5 нм, значительно меньше длины волны. Эванесцентная мода редко анализируется, но здесь она играет важную роль, поскольку её вклад определяет конкретную форму характеристик резонатора. Более того, эти явления не могут быть описаны с помощью теории эффективной среды, и в статье [31] предлагается более строгий анализ. В статье [31] показано, что сообщаемые резонансы очень чувствительны к любым структурным изменениям и могут быть использованы в сенсорных приложениях.

В статье [6] изучаются метаматериалы, известные как гиперболические среды, которые в обычном приближении локального отклика демонстрируют гиперболическую дисперсию и связанную с ней широкополосную сингулярность в плотности состояний. Вместо этого, из более микроскопической гидродинамической теории Друде в статье [6] выводятся качественно иные оптические свойства этих метаматериалов, обусловленные нелокальным оптическим откликом свободных электронов в их металлических компонентах. В статье [6] демонстрируется, что нелокальный отклик приводит к обрезанию дисперсии при больших волновых векторах, обратно пропорциональному фермиевской скорости электронного газа, но также для малых волновых векторов обнаружены различия в гиперболической дисперсии. Более того, в статье [6] показано, что размер элементарной ячейки влияет на эффективные параметры метаматериала даже в глубоко субволновом режиме. Наконец, корости электронного газа, но также для малых волновых векторов обнаружены различия в гиперболической дисперсии. Более того, в статье [6] показано, что вместо широкополосной суперсингулярности в локальной плотности состояний предсказано большое, но конечное максимальное усиление, пропорциональное обратному кубу фермиевской скорости.

В статье [32] разрабатывается общая теоретическая модель интегрированной генерации парных фотонов и плазмонов посредством спонтанного смешивания волн в нелинейных плазмонных и метаматериальных наноструктурах, строго учитывая дисперсию материала и потери в квантовом режиме через электромагнитную функцию Грина. В статье [32] идентифицируются корреляции фотонов и плазмонов в слоистых металл-диэлектрических структурах с 70 % внутренней квантовой эффективностью детектирования и раскрываем новый механизм усиления широкополосной генерации за счёт топологического перехода в гиперболических метаматериалах.

В отличие от сильного плазмонного рассеяния от металлических частиц или структур в металлических плёнках, в статье [33] показано, что узоры произвольной формы, изготовленные из многослойных гиперболических метаматериалов, становятся невидимыми в выбранном диапазоне оптических частот. Это происходит из-за аномально слабого рассеяния, когда диэлектрическая проницаемость многослойных гиперболиче-

ских метаматериалов в плоскости настраивается таким образом, чтобы соответствовать окружающей среде. Это новое явление описано теоретически и продемонстрировано экспериментально путём оптической характеризации различных узоров в многослойных гиперболических метаматериалах Au-Si. Это аномально слабое рассеяние нечувствительно к размерам, формам и углам падения узоров и имеет потенциальные применения в проектировании сечения рассеяния, оптическом шифровании, малозаметных проводящих зондах и оптоэлектрических устройствах.

Топологические изоляторы остаются неизменными лидерами в физике конденсированных сред благодаря своим уникальным электронным свойствам. Хорошо известное соответствие между объемом и границей обеспечивает существование устойчивых краевых или интерфейсных состояний, которые защищены топологическими характеристиками зонной структуры материала. Выходя за рамки традиционно подчёркиваемых в литературе связанных краевых состояний, в статье [34] исследуется, как топологически защищенные состояния распространяются на нетривиальное излучение вдали от ограничивающих границ раздела. В статье [34] разрабатывается метаматериал, чья спроектированная гиперболическая дисперсия включает в себя как хиральную, так и зеркальную симметрию. В статье [34] обсуждается, как связанная с этим степень свободы спиновой поляризации обеспечивает излучение, невосприимчивое к дефектам, с различными настраиваемыми направленными диаграммами направленности в дальней зоне. В статье [34] эксперименты однозначно демонстрируют топологическую устойчивость акустического излучения после преднамеренного добавления поглощающих и препятствующих дефектов, что потенциально может стимулировать исследования в области передовой акустики помещений и городской акустики.

В статье [35] изучается формирование конусов двойного резонанса второй гармоники в гиперболических метаматериалах. Электрический диполь на поверхности структуры индуцирует распространение света второй гармоники в два различных канала объёмных плазмон-поляритонов: сигнал, распространяющийся внутри собственного резонансного конуса, и сигнал с фазовой синхронизацией, удерживаемый в резонансном конусе накачки. В статье [35] показано, что дисперсия и двулучепреломление метаматериала вызывают большую угловую расходимость между двумя объёмными плазмонполяритонами, что делает эти структуры пригодными для субволновой микроскопии с визуализацией второй и более высоких гармоник.

В статье [36] теоретически и численно исследуются условия спасинга и оптическую динамику композитного гиперболического метаматериала, взаимодействующего с молекулами усиления. Комбинируя уравнения Максвелла-Блоха с подходом функций Грина, рассчитывается частота лазерного излучения и пороговую инверсию населенности для различной плотности усиления в слое усиления. В статье [36] демонстрируется высокий уровень усиления фотонной плотности состояний в широком спектральном диапазоне, обеспечиваемом гиперболическими метаструктурами. В статье [36] обнаружено, что прямые диполь-дипольные взаимодействия между молекулами в слое усиления оказывают незначительное влияние на условия спасинга. С учётом этих эффектов в статье [36] определяется область параметров, в которой может происходить спасинг.

В статье [37] показано, что функциональность гиперболических метаматериалов в ближнем электромагнитном поле, обычно предлагаемая для увеличения локальной плотности фотонных состояний, может быть достигнута с помощью тонких металлических плёнок. Хотя гиперболические метаматериалы обладают бесконечной плотностью внутренне распространяющихся состояний плоских волн, внешняя связь с близлежащими излучателями сильно ограничена. В статье [37] аналитически показано, что правильно спроектированные тонкие плёнки толщиной, сопоставимой с размером металла гиперболического метаматериала, обеспечивают локальную плотность состояний, та-

кую же высокую (если не выше), как у гиперболических метаматериалов. В статье [37] иллюстрируются эти идеи, выполняя точные численные вычисления локальной плотности состояний многослойных гиперболических метаматериалов, а также их применение к задаче максимизации теплопередачи в ближнем поле, чтобы показать, что однослойные тонкие плёнки являются подходящей заменой в обоих случаях.

В статье [38] изучаются оптические свойства квантовых дипольных излучателей, связанных с гиперболическими метаматериальными нанорезонаторами, используя полуаналитический подход квазинормальных мод. В статье [38] показано, что связь с метаматериальными нанорезонаторами может приводить к значительному усилению эффекта Пурселла, почти на порядок превышающему усиление плазмонных резонаторов с сопоставимой геометрией. Однако соответствующие коэффициенты β-фактора одиночного фотона чрезвычайно низки (около 10 %), намного меньше, чем у металлических резонаторов сопоставимого размера (70 %). Используя разложение функции Грина фотона в квазинормальные моды, в статье [38] описывается, как низкие коэффициенты β-фактора обусловлены повышенным омическим гашением, возникающим из-за красного смещения резонансов, большими добротностями и более сильным ограничением света внутри металла. В статье [38] объясняются, почему гиперболические метаматериальные наноструктуры, вероятно, являются плохим выбором для источников одиночных фотонов.

В статье [39] теоретически исследуются бездисперсионные щели и моды резонатора в одномерных фотонных кристаллах, состоящих из гиперболических метаматериалов и диэлектрика. Брэгговские щели в обычных полностью диэлектрических фотонных кристаллах всегда дисперсионны, поскольку фазы распространения в двух типах диэлектриков уменьшаются с углом падения. В статье [39] на основе компенсации фазовых вариаций между слоем гиперболического метаматериала и изотропным диэлектрическим слоем, дисперсия щели может быть компенсирована, и, таким образом, может быть реализована бездисперсионная щель. Более того, бездисперсионное свойство такой щели имеет широкое параметрическое пространство. В статье [39] показано, что бездисперсионная щель может быть использована для реализации бездисперсионной моды резонатора. Бездисперсионные щели и моды резонатора будут иметь важное применение в отражателях под любым углом, высокочастотных фильтрах, возбуждаемых источниками конечного размера, и процессах нелинейного смешения волн.

Активное управление радиационным теплопереносом по-прежнему остаётся открытой проблемой из-за его захватывающего потенциала применения. В связи с этим в статье [40] представляется теоретическая демонстрация динамически регулируемого ближнеполевого радиационного теплопереноса между двумя многослойными гиперболическими метаматериалами (состоящими из чередующихся слоёв магнитооптического материала и диэлектрика) с использованием внешнего магнитного поля. В статье [40] показано, что индуцированные намагниченностью гиперболические моды играют значительную роль в радиационном теплопереносе и позволяют осуществлять высокорегулируемый тепловой поток. Более того, гибридизация собственных и индуцированных намагниченностью гиперболических мод значительно усиливает радиационный теплоперенос. В частности, в статье [40] обнаружено, что преобразование поляризации из-за ненулевых недиагональных элементов позволяет спектральному коэффициенту теплопередачи для TE-поляризации быть таким же большим, как и для TM-поляризации, что существенно отличается от случая двух близко расположенных объемных магнитооптических пластин. Кроме того, для количественной характеристики тепловой модуляции в статье [40] показано, что возникает отрицательный эффект теплового магнитосопротивления в этой системе, который приближается к $-59.6\,\%$ при интенсивности магнитного поля 10 Тл. Результаты статье [40] могут быть полезны для активного бесконтактного

управления тепловыми процессами в наномасштабе и способствовать более глубокому пониманию механизмов магнитооптических гиперболических метаматериалов с точки зрения ближнеполевого радиационного теплообмена.

В статье [41] исследуется широкополосное и всенаправленное выпрямление в среднем инфракрасном диапазоне на основе наноструктурированных гиперболических метаматериалов, состоящих из двух разнородных металлов, разделенных сверхтонким диэлектрическим слоем. В статье [41] показано, что экзотические моды замедленного света, поддерживаемые такими периодически расположенными канавками гиперболическими метаматериалами, эффективно захватывают падающее излучение в массивно параллельных туннельных переходах металл-изолятор-металл, обеспечивая сверхбыстрое выпрямление в инфракрасном диапазоне посредством фотонно-стимулированного туннелирования. Это приводит к высокоэффективному преобразованию фотонов в электроны с полученным фототоком на порядки больше, чем у обычных устройств с сосредоточенными параметрами, таких как наноректенны и точечные контактные выпрямители. В статье [41] результаты обещают оказать влияние на устройства сбора инфракрасной энергии и плазмонные фотодетекторы.

В статье [42] показано, что гиперболические метаматериалы, реализованные в виде многослойных структур на основе двух материальных составляющих, расположенных в соответствии с апериодической последовательностью Туэ–Морса, могут проявлять сильные нелокальные эффекты, проявляющиеся в виде появления дополнительных экстраординарных волн, которые не предсказываются стандартными моделями теории эффективной среды (локальными моделями). С математической точки зрения, эти эффекты могут быть связаны со стационарными точками следа матрицы переноса и могут быть эффективно параметризованы с помощью формализма отображения следа. В статье [42] показано, что их возникновение сопровождается сильной зависимостью эффективных конститутивных параметров от волнового вектора. Несмотря на присущую периодичность, обеспечиваемую неизбежными (блоховского типа) окончаниями суперъячеек, в статье [42] показано, что такая сильная нелокальность сохраняется на любой произвольно высокой итерации, то есть приближаясь к фактическому апериодическому режиму. Более того, для определённых конфигураций параметров, при заданной длине волны и для двух заданных материальных слоёв, эти эффекты могут быть значительно менее выраженными, когда те же слои расположены стандартным периодическим образом. В статье [42] показано, что (апериодический) позиционный порядок слоёв представляет собой эффективную и технологически недорогую дополнительную степень свободы при проектировании оптической нелокальности.

Гиперболические метаматериалы, необычный класс электромагнитных метаматериалов, нашли важное применение в различных областях благодаря своим уникальным свойствам. Удивительной особенностью гиперболических метаматериалов является то, что даже непрерывные гиперболические метаматериалы могут обладать топологическими краевыми модами. Однако предыдущие исследования, основанные на поверхности равной частоты (аналогия поверхности Ферми), могут неточно описывать топологию целых зон. В статье [43] разрабатывается топологическое описание зон для непрерывных гиперболических метаматериалов, которое может быть описано неэрмитовым гамильтонианом, сформулированным из уравнений Максвелла. В статье [43] обнаружены два типа трёхмерных неэрмитовых тройно вырожденных точек со сложными линейными дисперсиями и топологическими зарядами ± 2 и 0, индуцированными хиральными и гиромагнитными эффектами. Из-за фотонной природы вакуумная зона играет важную роль в топологических краевых состояниях и соответствии между объёмом и краем в гиперболических метаматериалах. Результаты топологического описания зон численно подтверждаются прямым моделированием уравнений Максвелла. В

статье [43] представлен общий неэрмитовский топологический зонный подход к непрерывным гиперболическим метаматериалам, открывающий путь к исследованию интересных топологических фаз в фотонных континуумах и реализации топологических гиперболических метаматериалов в устройствах.

В статье [44] показано, что система из двух взаимодействующих гиперболических метаматериалов может быть использована для прямой субволновой визуализации в видимом диапазоне. В статье [44] предложенная конфигурация состоит из двух анизотропных фотонных кристаллов: многослойной металл-диэлектрической структуры и соединенной с ней проводящей структуры. В статье [44] результаты аналитических расчётов и численного моделирования показывают, что свет, излучаемый диполем, расположенным на вершине многослойной структуры, распространяется в узком конусе вдоль направления $\mathbf{n}$, где $\mathrm{Re}\,\varepsilon\,(\omega, \mathbf{n}) = 0$. Благодаря согласованию импедансов и отрицательному преломлению на границе раздела, в проводящей структуре фокусируется яркое изображение с максимальным поперечным размером приблизительно 50 нм на длине волны $\lambda = 650$ нм.

В статье [45] выражаются оптические свойства многослойных гиперболических метаматериалов через коэффициенты отражения Френеля на границе между метаматериалом и окружающей средой. Демонстрируется формирование полосы объёмных распространяющихся мод в гиперболических метаматериалах, расположенных далеко за пределами светового конуса однородных изотропных сред. В статье [45] воспроизводится экзотическое поведение гиперболических метаматериалов, такое как широкополосный эффект Пурселла и подавленное рассеяние наружу. Выводятся условия, при которых многослойная структура металл-диэлектрик может быть аппроксимирована однородной эффективной средой с экстремальной анизотропией (неопределенной средой). В статье [45] показано, что реальные многослойные гиперболические метаматериалы обычно имеют меньший фактор Пурселла, чем соответствующая эффективная среда; однако в статье [45] показано, что возможен и обратный сценарий благодаря промежуточной роли короткодействующих поверхностных плазмонных возбуждений во внешнем металлическом слое в многослойной структуре металл-диэлектрик.

В статье [46] показано, что гиперболические метаматериалы, демонстрирующие гиперболические диаграммы дисперсии волнового вектора, обладают двумя важными особенностями, связанными со сверхпоглощением: полная мощность, рассеянная наносферой, значительно увеличивается при размещении на поверхности гиперболического метаматериала по сравнению с поверхностями других материалов, и почти полностью направляется внутрь гиперболического метаматериала. В статье [46] показано, что эти две особенности характерны для интерфейсов гиперболических метаматериалов, и подтверждаем их с помощью исследования поперечно-электрических и магнитных волн, рассеянных субволновой наносферой, на основе спектральной теории. В статье [46] анализируется мощность рассеяния наносферы, поглощаемую различными конфигурациями подложки. В статье [46] также рассматриваются различные материалы наносфер.

В обычных одномерных фотонных кристаллах, полностью состоящих из диэлектриков, фотонные щели смещаются в сторону коротких длин волн (синий сдвиг) по мере увеличения угла падения как для поперечной магнитной, так и для поперечной электрической поляризации. Теоретически и экспериментально в статье [47] достигается красное смещение щелей в одномерных фотонных кристаллах, фотонных щелей, состоящих из альтернативных гиперболических метаматериалов и диэлектриков для поперечной магнитной поляризации, основанных на аномальной дисперсии волнового вектора гиперболических метаматериалов. В статье [47] гиперболический метаматериал имитируется слоистым диоксидом титана и серебром с субволновой элементарной ячейкой. Однако щели остаются смещенными в синюю сторону для поперечной электрической

поляризации. Поэтому края таких щелей могут быть использованы для высокоэффективного широкоугольного отбора поляризации. В статье [47] достигается эффективный отбор поляризации для углов падения от 50° до 80° на длине волны 365 нм.

Теоретическая модель гиперболических метаматериалов на основе уравнений Максвелла

Современная нанофотоника сталкивается с фундаментальным ограничением дифракционного предела, не позволяющим фокусировать свет в объем менее $\lambda^3/2$, где λ – длина волны излучения. Это ограничение, как известно, является следствием эллиптического характера изофер поверхности волновых векторов в обычных диэлектриках. Однако в 2007 году было теоретически предсказано и экспериментально подтверждено существование так называемых гиперболических метаматериалов — анизотропных сред, в которых тензор диэлектрической проницаемости имеет компоненты противоположных знаков [22, 48, 49].

Гиперболические метаматериалы характеризуются анизотропным тензором диэлектрической проницаемости, компоненты которого имеют противоположные знаки, что приводит к открытию гиперболической изочастотной поверхности и поддержанию распространения волн с большими волновыми векторами. Физическая природа гиперболических метаматериалов заключается в искусственно созданной анизотропии, когда одна из диагональных компонент тензора $\hat{\varepsilon}$ отрицательна, а две другие положительны. Это приводит к качественному изменению дисперсионных соотношений: изофер поверхности волновых векторов приобретает гиперболический вид, что теоретически позволяет распространяться электромагнитным волнам с произвольно большими волновыми числами k [50].

В настоящей работе развивается электродинамическая теория гиперболических метаматериалов, учитывающую пространственную дисперсию и диссипацию. Основное внимание уделяется получению аналитических выражений для ключевых характеристик метаматериала и их численной проверке в частотной области. Рассмотрим однородную анизотропную среду с диэлектрической проницаемостью, описываемой тензором второго ранга:

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \tag{6}$$

Для одноосного кристалла, ось которого направлена вдоль оси z, тензор проницаемости имеет вид:

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\parallel} \end{pmatrix}, \tag{7}$$

где $\varepsilon_{\perp}$ и $\varepsilon_{\parallel}$ – компоненты, перпендикулярная и параллельная оптической оси соответственно. Среда является гиперболической, если выполняется условие:

$$\mathrm{Re}(\varepsilon_{\perp}) \cdot \{Re(\varepsilon_{\parallel}) < 0. \tag{8}$$

В этом случае изочастотная поверхность, описывающая разрешённые волновые векторы $\mathbf{k}$ для данной частоты ω, принимает форму гиперболоида, а не эллипсода, как в обычных анизотропных кристаллах. Это фундаментальное отличие открывает путь к поддержанию высоко-k мод, то есть волн с очень большими поперечными волновыми числами, которые в обычных материалах являются затухающими.

Уравнения Максвелла в такой среде при отсутствии свободных электрических зарядов и токов принимают вид:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \,, \tag{9}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \hat{\varepsilon} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \,, \tag{10}$$

$$\nabla \cdot (\hat{\varepsilon}\mathbf{E}) = 0 \,, \tag{11}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \,. \tag{12}$$

Для монохроматических волн с временной зависимостью $e^{-i\omega t}$ уравнения (9)-(10) переходят в:

$$\nabla \times \mathbf{E} = i\omega\mu_0 \mathbf{H} \tag{13}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -i\omega\hat{\varepsilon}\mathbf{E} \tag{14}$$

Подставляя (13) в ротор (14), получаем волновое уравнение для электрического поля:

$$\nabla \times [\nabla \times \mathbf{E}] = \omega^2 \mu_0 \hat{\varepsilon} \mathbf{E} \,. \tag{15}$$

Используя векторное тождество $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$ и учитывая (11), получаем:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu_0 \hat{\varepsilon} \mathbf{E} = 0 \,. \tag{16}$$

Для плоской волны $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0 e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$ уравнение (16) приводит к системе линейных алгебраических уравнений:

$$\left[k^2 \mathbf{I} - \mathbf{k}\mathbf{k}^T - \omega^2 \mu_0 \hat{\varepsilon}\right] \mathbf{E}_0 = 0 \,. \tag{17}$$

Условие нетривиального решения определяет дисперсионное соотношение:

$$\det \left[k^2 \mathbf{I} - \mathbf{k}\mathbf{k}^T - \omega^2 \mu_0 \hat{\varepsilon}\right] = 0 \,. \tag{18}$$

Для простейшего случая одноосной анизотропии, когда $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_\perp$ и $\varepsilon_{zz} = \varepsilon_\parallel$, дисперсионное соотношение (18) распадается на два независимых уравнения для TE- и TM-поляризаций. Для TM-волн ($H_z \neq 0$) получаем:

$$\frac{k_\rho^2}{\varepsilon_\parallel} + \frac{k_z^2}{\varepsilon_\perp} = \frac{\omega^2}{c^2} \tag{19}$$

где $k_\rho^2 = k_x^2 + k_y^2$, $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ — скорость света в вакууме. В случае гиперболического метаматериала $\varepsilon_\parallel < 0$ и $\varepsilon_\perp > 0$, что приводит к гиперболическому виду изоферной поверхности:

$$\frac{k_\rho^2}{|\varepsilon_\parallel|} - \frac{k_z^2}{\varepsilon_\perp} = -\frac{\omega^2}{c^2} \tag{20}$$

Модель эффективной среды для описания гиперболических метаматериалов

Для описания гиперболических метаматериалов используем модель эффективной среды, рассматривая периодическую структуру как однородную анизотропную среду. Рассмотрим метаматериал, представляющий собой периодический набор металлических наностержней, встроенных в диэлектрическую матрицу. Эффективная диэлектрическая проницаемость определяется по формуле Максвелл–Гарнетта с учётом формы включений:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_d \frac{\varepsilon_m (1+f) + \varepsilon_d (1-f)}{\varepsilon_m (1-f) + \varepsilon_d (1+f)} \,, \tag{21}$$

где ε_m и ε_d – проницаемости металла и диэлектрика соответственно, f – доля металла.

Для анизотропной структуры компоненты тензора $\hat{\varepsilon}$ имеют вид:

$$\varepsilon_\perp = \varepsilon_d \frac{(1+f)\varepsilon_m + (1-f)\varepsilon_d}{(1-f)\varepsilon_m + (1+f)\varepsilon_d} \tag{22}$$

$$\varepsilon_\parallel = f\varepsilon_m + (1-f)\varepsilon_d \tag{23}$$

Реальные металлы характеризуются значительными потерями, которые описываются мнимой частью диэлектрической проницаемости. Используем модель Друде для металлической компоненты:

$$\varepsilon_m(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \tag{24}$$

где ω_p – плазменная частота, γ – частота столкновений.

Пространственная дисперсия учитывается через введение зависимости от волнового числа:

$$\varepsilon\left(\omega, k\right) = \varepsilon\left(\omega\right) + \beta k^2 \ , \tag{25}$$

где β – параметр нелокальности, связанный с размером элементарной ячейки метаматериала.

Одним из ключевых параметров, определяющих оптические свойства гиперболических метаматериалов, является плотность фотонных состояний. Для анизотропной среды плотность фотонных состояний определяется как:

$$\rho(\omega) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int \delta\left(\omega - \omega\left(\mathbf{k}\right)\right) d^3k \ . \tag{26}$$

Для гиперболической дисперсии (20) интеграл (26) берется по области, ограниченной гиперболоидом. Переходя к сферическим координатам в пространстве волновых векторов, получаем:

$$\rho(\omega) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\infty k_\rho dk_\rho \int_{-\infty}^\infty dk_z \delta\left(\omega - c\sqrt{\frac{k_\rho^2}{|\varepsilon_\parallel|} - \frac{k_z^2}{\varepsilon_\perp}}\right) \ . \tag{27}$$

После интегрирования получаем следующее выражение:

$$\rho(\omega) = \frac{\omega^2}{2\pi^2 c^3} \sqrt{|\varepsilon_\parallel|\varepsilon_\perp} \left(\ln\left(\frac{k_{\max}}{k_{\min}}\right) + \frac{1}{2}\right) \ , \tag{28}$$

где $k_{\max}$ и $k_{\min}$ – верхний и нижний пределы волновых чисел, определяемые размером элементарной ячейки и условиями квантования.

Характерной особенностью гиперболических метаматериалов является существование высоко-k мод, которые испытывают сильное затухание в направлении перпендикулярно оптической оси. Длина проникновения таких мод определяется как:

$$L_p = \frac{1}{\mathrm{Im}(k_z)} = \frac{2c}{\omega\sqrt{\varepsilon_\perp}} \ . \tag{29}$$

Усиление электрического поля вблизи поверхности гиперболических метаматериалов может быть оценено по формуле:

$$\eta = \left|\frac{E_{\text{GMM}}}{E_0}\right|^2 = \frac{4|\varepsilon_\parallel|}{(\mathrm{Re}(\sqrt{\varepsilon_\parallel}) + \sqrt{\varepsilon_\perp})^2 + \mathrm{Im}(\sqrt{\varepsilon_\parallel})^2} \ . \tag{30}$$

При $\mathrm{Im}(\varepsilon_\parallel) \to 0$ усиление стремится к:

$$\eta_{\max} = \frac{4|\varepsilon_\parallel|}{(\sqrt{|\varepsilon_\parallel|} + \sqrt{\varepsilon_\perp})^2} \ . \tag{31}$$

Групповая скорость электромагнитной волны в анизотропной среде определяется следующим выражением:

$$\mathbf{v}_g = \nabla_{\mathbf{k}}\omega(\mathbf{k}) = \frac{c^2}{\omega}\left(\frac{k_x}{|\varepsilon_\parallel|}\hat{\mathbf{x}} + \frac{k_y}{|\varepsilon_\parallel|}\hat{\mathbf{y}} - \frac{k_z}{\varepsilon_\perp}\hat{\mathbf{z}}\right) \ . \tag{32}$$

Вектор Умова–Пойнтинга, характеризующий энергетический поток, имеет следующий вид:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2}\,\mathrm{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) = \frac{1}{2\omega\mu_0}\,\mathrm{Re}\left(\mathbf{E} \times (\mathbf{k} \times \mathbf{E}^*)\right) \ . \tag{33}$$

Для TM-волн в гиперболических метаматериалах:

$$\mathbf{S} = \frac{|E_0|^2}{2\omega\mu_0}\left(\frac{k_x}{|\varepsilon_\parallel|}\hat{\mathbf{x}} + \frac{k_y}{|\varepsilon_\parallel|}\hat{\mathbf{y}} - \frac{k_z}{\varepsilon_\perp}\hat{\mathbf{z}}\right) \ . \tag{34}$$

Сравнивая (32) и (34), видим, что вектор Умова–Пойнтинга параллелен групповой скорости, что является следствием сохранения энергии.

Теоретическая модель отражения и пропускания на плоской границе раздела с гиперболическим метаматериалом

Рассмотрим плоскую границу раздела $z = 0$ между вакуумом ($z < 0$) и полубесконечным гиперболическим метаматериалом ($z > 0$). На границу падает плоская монохроматическая волна с частотой ω и волновым вектором $\mathbf{k}_i$, лежащим в плоскости $x - z$. Угол падения обозначим θ_i. Без потери общности, оптическая ось гиперболического метаматериала лежит в плоскости падения и составляет угол ϕ с осью z. Тогда тензор диэлектрической проницаемости в лабораторной системе координат получается преобразованием вращения:

$$\hat{\varepsilon}' = R\,(\phi)\,\hat{\varepsilon}R^{-1}\,(\phi) \ , \tag{35}$$

где $R\,(\phi)$ – матрица поворота вокруг оси y.

Волновое уравнение для монохроматического поля $\mathbf{E}\,(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}\,(\mathbf{r})\,e^{-i\omega t}$ в анизотропной среде без источников имеет вид:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2\hat{\varepsilon}'\mathbf{E} = 0 \ , \tag{36}$$

где $k_0 = \omega/c$ — волновое число в вакууме. Будем искать решение для прошедшей в гиперболическом метаматериале волны в виде плоской волны:

$$\mathbf{E}_t(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_t^0 e^{i\mathbf{k}_t\cdot\mathbf{r}}, \tag{37}$$

где $\mathbf{k}_t = (k_x, 0, k_z)$ – волновой вектор в гиперболическом метаматериале. Из условий непрерывности на границе следует сохранение тангенциальной компоненты волнового вектора:

$$k_x = k_0 \sin\theta_i \ . \tag{38}$$

Подстановка (36) в (35) даёт систему однородных уравнений:

$$[\mathbf{k}_t \times [\mathbf{k}_t \times \mathbf{E}_t^0]] + k_0^2\hat{\varepsilon}'\mathbf{E}_t^0 = 0 \ . \tag{39}$$

Раскрывая двойное векторное произведение, получаем:

$$\mathbf{k}_t \left(\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{E}_t^0\right) - k_t^2 \mathbf{E}_t^0 + k_0^2 \hat{\varepsilon}' \mathbf{E}_t^0 = 0 \, . \tag{40}$$

Это система трёх уравнений относительно компонент вектора $\mathbf{E}_t^0$. Условием её разрешимости является равенство нулю детерминанта:

$$\det \left[k_\alpha k_\beta - k_t^2 \delta_{\alpha\beta} + k_0^2 \varepsilon'_{\alpha\beta}\right] = 0 \, . \tag{41}$$

Это уравнение определяет связь между k_x и k_z, то есть дисперсионное соотношение для волн в гиперболических метаматериалах. Для случая, когда оптическая ось лежит в плоскости падения ($\phi \neq 0, \pi/2$), уравнение (40) распадается на два независимых уравнения для обыкновенной и необыкновенной волн. Однако в гиперболических метаматериалах эти моды сильно связаны.

Рассмотрим для простоты случай $\phi = 0$ (оптическая ось параллельна z). Тогда тензор $\hat{\varepsilon}'$ диагонален. В этом случае система (39) распадается. Для s-поляризации (перпендикулярной, $E_y \neq 0$) электрическое поле перпендикулярно плоскости падения и оптической оси. Уравнение для y-компоненты даёт:

$$-k_t^2 E_y + k_0^2 \varepsilon_\perp E_y = 0 \quad \Rightarrow \quad k_x^2 + k_z^2 = k_0^2 \varepsilon_\perp \, . \tag{42}$$

Это стандартное дисперсионное соотношение для обыкновенной волны. Для p-поляризации (параллельной, $E_x, E_z \neq 0$) получаем систему:

$$(-k_z^2 + k_0^2 \varepsilon_\perp) E_x + (k_x k_z) E_z = 0 \, , \tag{43}$$

$$(k_x k_z) E_x + (-k_x^2 + k_0^2 \varepsilon_\parallel) E_z = 0 \, . \tag{44}$$

Приравнивая детерминант к нулю, получаем дисперсионное соотношение для необыкновенной волны:

$$\frac{k_x^2}{\varepsilon_\parallel} + \frac{k_z^2}{\varepsilon_\perp} = k_0^2 \, . \tag{45}$$

Именно уравнение (43) описывает гиперболическую дисперсию. Действительно, если $\varepsilon_\perp > 0$ и $\varepsilon_\parallel < 0$ (гиперболические метаматериалы первого типа), то (43) принимает вид:

$$\frac{k_x^2}{|\varepsilon_\parallel|} - \frac{k_z^2}{\varepsilon_\perp} = k_0^2 \, , \tag{46}$$

что является уравнением гиперболы в (k_x, k_z)-пространстве. Если $\varepsilon_\perp < 0$ и $\varepsilon_\parallel > 0$ (гиперболические метаматериалы второго типа), то:

$$-\frac{k_x^2}{\varepsilon_\parallel} + \frac{k_z^2}{|\varepsilon_\perp|} = k_0^2 . \tag{47}$$

Из (43) можно выразить k_z для необыкновенной волны:

$$k_z^{(p)} = \sqrt{\varepsilon_\perp \left(k_0^2 - \frac{k_x^2}{\varepsilon_\parallel}\right)} . \tag{48}$$

Знак корня выбирается из условия излучения Зоммерфельда: волна должна не расти, а затухать при $z \to +\infty$. Это условие означает $\mathrm{Im}\,(k_z) > 0$. В гиперболическом режиме, когда подкоренное выражение отрицательно, k_z становится чисто мнимым, что соответствует затухающей волне. Однако, в отличие от обычных материалов, эта затухающая волна может переносить энергию вдоль границы.

Теперь перейдём к решению граничной задачи. Для s-поляризации поля в вакууме ($z < 0$) записываются как суперпозиция падающей и отражённой волн:

$$\mathbf{E}_y(z) = E_i e^{ik_x x}(e^{ik_{z0}z} + r_s e^{-ik_{z0}z}) \,, \tag{49}$$

$$\mathbf{H}_x(z) = -\frac{k_{z0}}{\omega\mu_0} E_i e^{ik_x x}(e^{ik_{z0}z} - r_s e^{-ik_{z0}z}) \,, \tag{50}$$

$$\mathbf{H}_z(z) = \frac{k_x}{\omega\mu_0} E_i e^{ik_x x}(e^{ik_{z0}z} + r_s e^{-ik_{z0}z}) \,, \tag{51}$$

где $k_{z0} = \sqrt{k_0^2 - k_x^2}$ – z-компонента волнового вектора в вакууме, r_s – коэффициент отражения для s-поляризации. В гиперболических метаматериалах ($z > 0$) для s-поляризации существует только обыкновенная волна:

$$\mathbf{E}_y\,(z) = t_s E_i e^{ik_x x} e^{ik_z^{(s)} z}, \tag{52}$$

$$\mathbf{H}_x\,(z) = -\frac{k_z^{(s)}}{\omega\mu_0} t_s E_i e^{ik_x x} e^{ik_z^{(s)} z} \,, \tag{53}$$

$$\mathbf{H}_z\,(z) = \frac{k_x}{\omega\mu_0} t_s E_i e^{ik_x x} e^{ik_z^{(s)} z} \,, \tag{54}$$

где t_s – коэффициент пропускания, а $k_z^{(s)} = \sqrt{k_0^2\varepsilon_\perp - k_x^2}$ из (41). Условия непрерывности тангенциальных компонент $\mathbf{E}_y$ и $\mathbf{H}_x$ при $z = 0$ дают систему:

$$1 + r_s = t_s \,, \tag{55}$$

$$k_{z0}\,(1 - r_s) = k_z^{(s)} t_s \,. \tag{56}$$

Решая её, находим коэффициенты Френеля для s-поляризации:

$$r_s = \frac{k_{z0} - k_z^{(s)}}{k_{z0} + k_z^{(s)}} \,, \tag{57}$$

$$t_s = \frac{2k_{z0}}{k_{z0} + k_z^{(s)}} \,. \tag{58}$$

Эти выражения формально совпадают с таковыми для изотропной среды с эффективной проницаемостью $\varepsilon_\perp$, однако физика процесса иная, поскольку $k_z^{(s)}$ может быть комплексным даже при отсутствии потерь, если $\varepsilon_\perp < 0$.

Для p-поляризации расчёт сложнее. Поля в вакууме:

$$\mathbf{E}_x\,(z) = E_i \cos\theta_i e^{ik_x x}(e^{ik_{z0}z} - r_p e^{-ik_{z0}z}) \,, \tag{59}$$

$$\mathbf{E}_z\,(z) = -E_i \sin\theta_i e^{ik_x x}(e^{ik_{z0}z} + r_p e^{-ik_{z0}z}) \,, \tag{60}$$

$$\mathbf{H}_y\,(z) = \frac{k_0}{\omega\mu_0} E_i e^{ik_x x}(e^{ik_{z0}z} + r_p e^{-ik_{z0}z}) \,. \tag{61}$$

В гиперболических метаматериалах для p-поляризации существует только необыкновенная волна. Её поля выражаются через амплитуду t_p и волновой вектор $\mathbf{k}_t = \left(k_x, 0, k_z^{(p)}\right)$, где $k_z^{(p)}$ задаётся формулой (46). Однако направление вектора $\mathbf{E}$ не перпендикулярно $\mathbf{k}_t$ из-за анизотропии. Из уравнений Максвелла $\nabla \times \mathbf{H} = -i\omega\varepsilon_0\hat{\varepsilon}\mathbf{E}$ и $\nabla \times \mathbf{E} = i\omega\mu_0\mathbf{H}$ следует связь между компонентами $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$. Для p-поляризации в гиперболических метаматериалах ($\mathbf{H} = (0, H_y, 0)$) получаем:

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} = i\omega\mu_0 H_y \,, \tag{62}$$

$$-ik_z^{(p)} H_y = -i\omega\varepsilon_0\varepsilon_\perp E_x \,, \tag{63}$$

$$ik_x H_y = -i\omega\varepsilon_0\varepsilon_\parallel E_z \,. \tag{64}$$

Отсюда находим отношения компонент электрического поля в гиперболических метаматериалах:

$$\frac{E_x}{E_z} = -\frac{k_z^{(p)}\varepsilon_\parallel}{k_x\varepsilon_\perp} \ . \tag{65}$$

Таким образом, поля в гиперболических метаматериалах для p-поляризации можно записать как:

$$\mathbf{E}_x\left(z\right) = t_p E_i \cos\theta_i e^{ik_x x} e^{ik_z^{(p)} z} A \ , \tag{66}$$

$$\mathbf{E}_z\left(z\right) = t_p E_i \cos\theta_i e^{ik_x x} e^{ik_z^{(p)} z} B \ , \tag{67}$$

$$\mathbf{H}_y\left(z\right) = t_p \frac{k_0}{\omega\mu_0} E_i e^{ik_x x} e^{ik_z^{(p)} z} C \ , \tag{68}$$

где A, B, C – константы, определяемые из соотношений (58)-(60). В частности, из (60) и (58) следует:

$$E_x = -\frac{k_z^{(p)}}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_\perp} H_y, \quad E_z = \frac{k_x}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_\parallel} H_y \ . \tag{69}$$

Сравнивая с (61) и (62), находим:

$$A = -\frac{k_z^{(p)}}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_\perp} \cdot \frac{\omega\mu_0}{k_0 C}, \quad B = \frac{k_x}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_\parallel} \cdot \frac{\omega\mu_0}{k_0 C} \ . \tag{70}$$

Удобно выбрать нормировку так, чтобы $C = 1$, тогда:

$$A = -\frac{k_z^{(p)}}{k_0\varepsilon_\perp}, \quad B = \frac{k_x}{k_0\varepsilon_\parallel}. \tag{71}$$

Теперь условия непрерывности при $z = 0$ для p-поляризации: непрерывность E_x и H_y. Из (55) и (61) с учётом (66):

$$\cos\theta_i(1 - r_p) = t_p A = -t_p \frac{k_z^{(p)}}{k_0\varepsilon_\perp} \ , \tag{72}$$

$$\frac{k_0}{\omega\mu_0}(1 + r_p) = t_p \frac{k_0}{\omega\mu_0} \ . \tag{73}$$

Из (68) сразу следует:

$$1 + r_p = t_p. \tag{74}$$

Подставляя (69) в (67), получаем:

$$\cos\theta_i\left(1 - r_p\right) = -\left(1 + r_p\right)\frac{k_z^{(p)}}{k_0\varepsilon_\perp}. \tag{75}$$

Выражая r_p:

$$r_p = \frac{\cos\theta_i + \frac{k_z^{(p)}}{k_0\varepsilon_\perp}}{\cos\theta_i - \frac{k_z^{(p)}}{k_0\varepsilon_\perp}}. \tag{76}$$

Учитывая, что $k_{z0} = k_0\cos\theta_i$ и $k_x = k_0\sin\theta_i$, а также используя дисперсионное соотношение (43), можно преобразовать ((71) к более симметричному виду. После алгебраических преобразований получаем окончательное выражение для коэффициента отражения p-поляризации:

$$r_p = \frac{\varepsilon_\parallel k_{z0} - k_z^{(p)}}{\varepsilon_\parallel k_{z0} + k_z^{(p)}}. \tag{77}$$

Соответственно, коэффициент пропускания:

$$t_p = \frac{2\varepsilon_\parallel k_{z0}}{\varepsilon_\parallel k_{z0} + k_z^{(p)}} \ . \tag{78}$$

Заметим, что при $\varepsilon_\perp = \varepsilon_\parallel = \varepsilon$ формулы (43) и (44) переходят в стандартные формулы Френеля для изотропной среды. Коэффициент пропускания по полю t_p связан с коэффициентом пропускания по энергии T_p соотношением, учитывающим изменение импеданса:

$$T_p = |t_p|^2 \frac{\mathrm{Re}(k_z^{(p)}/\varepsilon_\perp)}{k_{z0}} \ . \tag{79}$$

Аналогично для s-поляризации:

$$T_s = |t_s|^2 \frac{\mathrm{Re}(k_z^{(s)})}{k_{z0}} \ . \tag{80}$$

Формулы (52), (53), (72), (73) являются основными результатами теоретической части и позволяют провести полный анализ отражения и пропускания гиперболических метаматериалах.

Проанализируем полученные выражения коэффициентов отражения и пропускания излучения. Начнём с s-поляризации. Коэффициент отражения r_s определяется формулой (52). Его поведение качественно похоже на случай изотропной среды с $\varepsilon = \varepsilon_\perp$. Если $\varepsilon_\perp > 0$ и вещественно, то при $\sin\theta_i > \sqrt{\varepsilon_\perp}$ наступает полное внутреннее отражение, $k_z^{(s)}$ становится мнимым, и $|r_s| = 1$. Если же $\varepsilon_\perp < 0$ (что возможно в гиперболических метаматериалах второго типа), то $k_z^{(s)}$ всегда мнимый, и отражение полное при всех углах падения, $|r_s| = 1$.

Интересные эффекты возникают для p-поляризации. Коэффициент r_p задаётся формулой (72). Он обращается в нуль, когда числитель равен нулю:

$$\varepsilon_\parallel k_{z0} - k_z^{(p)} = 0 \ . \tag{81}$$

Это условие можно переписать, используя (17):

$$\varepsilon_\parallel^2 k_0^2 \cos^2\theta_i = \varepsilon_\perp (k_0^2 \varepsilon_\parallel - k_0^2 \sin^2\theta_i) \ . \tag{82}$$

Решая относительно $\sin^2\theta_B$ (угол Брюстера), получаем:

$$\sin^2\theta_B = \frac{\varepsilon_\parallel(\varepsilon_\parallel - \varepsilon_\perp)}{\varepsilon_\parallel^2 - \varepsilon_\perp} \ . \tag{83}$$

В изотропном случае ($\varepsilon_\perp = \varepsilon_\parallel = \varepsilon$) это даёт стандартный результат $\tan\theta_B = \sqrt{\varepsilon}$. В гиперболическом случае, когда $\varepsilon_\perp$ и $\varepsilon_\parallel$ имеют разные знаки, уравнение (79) может иметь вещественное решение θ_B даже при вещественных $\varepsilon_\perp$ и $\varepsilon_\parallel$. Это означает существование угла, при котором отражение p-поляризованной волны полностью исчезает, несмотря на то, что импедансы вакуума и гиперболического метаматериала не совпадают. Этот эффект можно назвать псевдо-Брюстеровским эффектом.

Рассмотрим численный пример. Пусть $\varepsilon_\perp = 2$, $\varepsilon_\parallel = -3 + i\delta$, где δ – малый параметр потерь. Подставляя в (79), получаем:

$$\sin^2\theta_B = \frac{(-3)(-3-2)}{9-2} = \frac{15}{7} \approx 2.14 \ . \tag{84}$$

Это значение больше 1, что означает отсутствие вещественного угла Брюстера. Однако если взять $\varepsilon_\perp = -2$, $\varepsilon_\parallel = 3$, то:

$$\sin^2\theta_B = \frac{3(3-(-2))}{9-(-2)} = \frac{15}{11} \approx 1.36, \tag{85}$$

что также больше 1. Таким образом, для вещественных $\varepsilon_\perp$, $\varepsilon_\parallel$ с разными знаками условие $r_p = 0$ не может быть выполнено для вещественного θ_B. Однако при учёте потерь ($\mathrm{Im}(\varepsilon_\alpha) \neq 0$) минимум коэффициента отражения может наблюдаться при некотором угле, близком к мнимому решению уравнения (77).

Другим важным аспектом является поведение $k_z^{(p)}$ при больших k_x. Из (46) следует, что при $k_x \to \infty$:

$$k_z^{(p)} \approx ik_x\sqrt{-\frac{\varepsilon_\perp}{\varepsilon_\parallel}}. \tag{86}$$

В гиперболическом режиме подкоренное выражение положительно, и $k_z^{(p)}$ растёт линейно с k_x. Это означает, что высоко-пространственные гармоники (ближнее поле) экспоненциально затухают в гиперболических метаматериалах на очень малых расстояниях. Однако, как будет показано ниже, это затухание может компенсироваться большими значениями коэффициента пропускания t_p для таких гармоник.

Проанализируем коэффициент пропускания t_p из (44). При больших k_x имеем $k_{z0} \approx ik_x$, $k_z^{(p)} \approx ik_x\sqrt{-\varepsilon_\perp/\varepsilon_\parallel}$. Подставляя в (44), получаем:

$$t_p \approx \frac{2\varepsilon_\parallel(ik_x)}{\varepsilon_\parallel(ik_x) + ik_x\sqrt{-\varepsilon_\perp/\varepsilon_\parallel}} = \frac{2\varepsilon_\parallel}{\varepsilon_\parallel + \sqrt{-\varepsilon_\perp\varepsilon_\parallel}}\,. \tag{87}$$

Если $\varepsilon_\perp$ и $\varepsilon_\parallel$ вещественны и имеют противоположные знаки, то знаменатель вещественен, и t_p не стремится к нулю при $k_x \to \infty$, в отличие от случая обычных диэлектриков, где $t_p \sim 1/k_x$. Это ключевое наблюдение: гиперболические метаматериалы могут эффективно пропускать сквозь границу волны с очень большими поперечными волновыми числами. Именно это свойство лежит в основе их способности преодолевать дифракционный предел.

Однако на практике из-за неизбежных потерь коэффициент t_p на больших k_x всё же ограничен. Рассмотрим модель с потерями: $\varepsilon_\parallel = \varepsilon'_\parallel + i\varepsilon''_\parallel$, $\varepsilon_\perp = \varepsilon'_\perp + i\varepsilon''_\perp$. Тогда при $k_x \to \infty$:

$$k_z^{(p)} \approx ik_x\sqrt{-\frac{\varepsilon'_\perp + i\varepsilon''_\perp}{\varepsilon'_\parallel + i\varepsilon''_\parallel}}\,. \tag{88}$$

Это выражение можно упростить, предположив малые потери ($\varepsilon'' \ll |\varepsilon'|$):

$$k_z^{(p)} \approx ik_x\sqrt{-\frac{\varepsilon'_\perp}{\varepsilon'_\parallel}}\left(1 + \frac{i}{2}\left(\frac{\varepsilon''_\perp}{\varepsilon'_\perp} - \frac{\varepsilon''_\parallel}{\varepsilon'_\parallel}\right)\right)\,. \tag{89}$$

Тогда мнимая часть имеет вид:

$$\mathrm{Im}\left(k_z^{(p)}\right) \approx k_x\sqrt{-\frac{\varepsilon'_\perp}{\varepsilon'_\parallel}}\cdot\frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon''_\perp}{\varepsilon'_\perp} - \frac{\varepsilon''_\parallel}{\varepsilon'_\parallel}\right)\,. \tag{90}$$

Для существования затухающей волны необходимо $\mathrm{Im}\left(k_z^{(p)}\right) > 0$, что накладывает условие на соотношение потерь:

$$\frac{\varepsilon''_\perp}{\varepsilon'_\perp} > \frac{\varepsilon''_\parallel}{\varepsilon'_\parallel}\,. \tag{91}$$

Если это условие нарушается, то в среде могут возникать усиленные волны, что указывает на неустойчивость.

Коэффициент пропускания t_p при больших k_x в модели с потерями:

$$t_p \approx \frac{2(\varepsilon'_{\parallel} + i\varepsilon''_{\parallel})}{(\varepsilon'_{\parallel} + i\varepsilon''_{\parallel}) + \sqrt{-(\varepsilon'_{\perp} + i\varepsilon''_{\perp})(\varepsilon'_{\parallel} + i\varepsilon''_{\parallel})}} \,. \tag{92}$$

Его модуль $|t_p|$ стремится к константе, но эта константа может быть меньше, чем в случае без потерь, из-за мнимых частей.

Модель гиперболических метаматериалов

Фундаментальные физические постоянные и параметры материалов, используемые в программе, принимают следующие значения: скорость света в вакууме равна $c = 2.99792458e8$ м/с, магнитная постоянная равна $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, электрическая постоянная равна $\varepsilon_0 = 8.854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, волновое сопротивление вакуума $\zeta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$.

Эффективная диэлектрическая проницаемость для наноразмерных включений серебра описывается моделью Друде:

$$\varepsilon_{Ag}(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \,, \tag{93}$$

где использованы следующие обозначения физических величин: циклическая частота $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$, плазменная частота $\omega_p = 1.37 \cdot 10^{16}$ рад/с, коэффициент затухания $\gamma = 1.07 \cdot 10^{14}$ рад/с, высокочастотная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_\infty = 3.7$ [51].

Диэлектрическая проницаемость матрицы из оксида алюминия Al_2O_3 моделируется с использованием соотношения типа:

$$\varepsilon_{Al_2O_3}(\lambda) = 1 + \sum_{j=1}^{3} \frac{B_j \lambda^2}{\lambda^2 - C_j^2} \,, \tag{94}$$

где коэффициенты B_j и C_j подобраны по экспериментальным данным.

Для нанокомпозитного материала с объёмной долей f включений (серебра) компоненты тензора эффективной диэлектрической проницаемости в приближении Максвелл–Гарнетта для поперечной и продольной компонент определяются следующим образом:

$$\varepsilon_\perp = \varepsilon_m \frac{1 + 2f\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_m}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m}}{1 - f\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_m}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m}} \,, \tag{95}$$

$$\varepsilon_\parallel = \varepsilon_m \frac{1 + f\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_m}{\varepsilon_i + \varepsilon_m}}{1 - f\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_m}{\varepsilon_i + \varepsilon_m}} \,, \tag{96}$$

где ε_m – диэлектрическая проницаемость матрицы ($\varepsilon_{Al_2O_3}$), а ε_i – диэлектрическая проницаемость включений (ε_{Ag}).

Материал проявляет гиперболическую дисперсию, когда выполняется условие гиперболического режима:

$$\varepsilon_\parallel \varepsilon_\perp < 0 \,. \tag{97}$$

Эффективные компоненты диэлектрической проницаемости нанокомпозита вычис-

ляются для каждой длины волны λ и объёмной доли f:

$$\varepsilon_{\perp}(\lambda, f) = \varepsilon_{Al_2O_3}(\lambda) \frac{1 + 2f \frac{\varepsilon_{Ag}(\lambda) - \varepsilon_{Al_2O_3}(\lambda)}{\varepsilon_{Ag}(\lambda) + 2\varepsilon_{Al_2O_3}(\lambda)}}{1 - f \frac{\varepsilon_{Ag}(\lambda) - \varepsilon_{Al_2O_3}(\lambda)}{\varepsilon_{Ag}(\lambda) + 2\varepsilon_{Al_2O_3}(\lambda)}} , \tag{98}$$

$$\varepsilon_{\parallel}(\lambda, f) = \varepsilon_{Al_2O_3}(\lambda) \frac{1 + f \frac{\varepsilon_{Ag}(\lambda) - \varepsilon_{Al_2O_3}(\lambda)}{\varepsilon_{Ag}(\lambda) + \varepsilon_{Al_2O_3}(\lambda)}}{1 - f \frac{\varepsilon_{Ag}(\lambda) - \varepsilon_{Al_2O_3}(\lambda)}{\varepsilon_{Ag}(\lambda) + \varepsilon_{Al_2O_3}(\lambda)}} . \tag{99}$$

Эффективный показатель преломления нанокомпозита определяется как геометрическое среднее компонент тензора диэлектрической проницаемости:

$$n_{eff}(\lambda, f) = \sqrt{\varepsilon_{\perp}(\lambda, f)\, \varepsilon_{\parallel}(\lambda, f)} . \tag{100}$$

Поверхностный импеданс нанокомпозита задаётся выражением:

$$\zeta_s(\lambda, f) = \sqrt{\frac{\mu_{eff}}{\varepsilon_{\perp}(\lambda, f)}} , \tag{101}$$

где μ_{eff} – эффективная магнитная проницаемость нанокомпозита.

Коэффициенты отражения (R), пропускания (T) и поглощения (A) рассчитываются с использованием метода матриц переноса с коэффициентами Френеля для однослойной структуры на подложке. Векторы волновых чисел вычисляются по формулам:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} , \tag{102}$$

$$k_x = k_0 \sin(\theta_i) , \tag{103}$$

$$k_{z,film} = \sqrt{\varepsilon_{\perp} k_0^2 - k_x^2} . \tag{104}$$

Характеристические поверхностные импедансы вычисляются по следующим формулам:

$$\zeta_{air} = \zeta_0 , \tag{105}$$

$$\zeta_{film} = \sqrt{\frac{\mu_{eff}}{\varepsilon_{\perp}}} , \tag{106}$$

$$\zeta_s = \frac{\zeta_0}{n_s} , \tag{107}$$

Матрицы переноса вычисляются по формулам:

$$M_{film} = \begin{pmatrix} \cos(k_{z,film} d) & i\zeta_{film} \sin(k_{z,film} d) \\ \frac{i}{\zeta_{film}} \sin(k_{z,film} d) & \cos(k_{z,film} d) \end{pmatrix} , \tag{108}$$

$$M_n = M_{air} M_{film} M_s . \tag{109}$$

Амплитудные коэффициенты Френеля вычисляются по формулам:

$$r = \frac{M_n(1,1)}{M_n(2,1)} , \tag{110}$$

$$t = \frac{1}{M_n(2,1)} . \tag{111}$$

Энергетические коэффициенты Френеля вычисляются по формулам:

$$R = |r|^2 \ , \tag{112}$$

$$T = \frac{\zeta_{air}}{\zeta_s} \cos\theta_i \, |t|^2 \ , \tag{113}$$

$$A = 1 - R - T \ . \tag{114}$$

Для гиперболических материалов дисперсионное соотношение в пространстве волновых векторов имеет вид:

$$\frac{k_\parallel^2}{\varepsilon_\parallel} + \frac{k_\perp^2}{\varepsilon_\perp} = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \ , \tag{115}$$

Это уравнение описывает изочастотные поверхности, которые проявляют гиперболическую форму, когда $\varepsilon_\parallel \varepsilon_\perp < 0$.

Модель позволяет визуализировать комплексные компоненты диэлектрической проницаемости ($\varepsilon_\perp$ и $\varepsilon_\parallel$), эффективный показатель преломления n_{eff}, поверхностный импеданс Z_s, коэффициенты Френеля (R, T, A) в виде двумерных и трёхмерных контурных карт, изочастотные поверхности в пространстве волновых векторов и карты усиления поглощения излучения.

В теоретической модели учитывается эффективная магнитная проницаемость включений (серебро/оксид алюминия) с использованием аппроксимации Друде-Лоренца:

$$\mu_{\text{eff}}(\lambda) = 1 + \frac{F_m \omega_{pm}^2}{\omega_{0m}^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_m} \ , \tag{116}$$

где параметры подбираются на основе геометрии наноструктур: $\omega_T = \frac{4c(r_1+r_2)}{\pi\sqrt{r_1}r_2^{3/2}}$, $\omega_{0m} = 0.07\omega_T$, $\omega_{pm} = 1.25\sqrt{2}\omega_{0m}$, где r_1 и r_2 – характерные радиусы включений.

В программной реализации учитываются следующие условия моделирования: диапазон объёмных долей включений $f \in [0.02, 0.06]$ с шагом 0.02, диапазон углов падения $\theta_i \in [0°, 60°]$, толщина плёнки $d = 750$ нм, показатель преломления подложки $n_s = 1.52$, подавление сингулярностей при расчётах методом матриц переноса, визуализация комплексных величин (действительная, мнимая части, модуль и фаза).

Результаты численных расчётов оптических характеристик гиперболических метаматериалов

Разработка программы численного моделирования оптических процессов в плёнках из гиперболического метаматериала представляет собой многоэтапный процесс, требующий логического согласования физических моделей, численных методов и алгоритмической реализации. Описание этапов разработки начинается с предварительного анализа физических основ, необходимых для корректного макетирования взаимодействия света с композитной средой, и завершается визуализацией и анализом результатов. Ниже приведено последовательное описание этапов, объединённых единой концептуальной цепочкой.

Начальный этап предполагает определение физической модели системы и задаёт основные параметры, которые должны быть учтены в вычислениях. На этом шаге формулируются базовые уравнения для эффективных параметров метаматериала — диэлектрической и магнитной проницаемости в приближении Максвелл–Гарнетта. Важно сформулировать граничные условия для оптического спектрального диапазона, где компоненты метаматериала (например, серебро и оксид алюминия) проявляют специфические дисперсионные свойства. На этом этапе также уточняются геометрические

параметры включений (радиусы, периоды решётки) и выбираются подходящие материалы, соответствующие реальным экспериментальным данным или теоретическим расчётам.

Следующим логически связанным шагом становится определение материальных уравнений, описывающих диэлектрическую и магнитную проницаемости отдельных компонентов композита. Здесь формулируются дисперсионные модели для включений из гиперболического метаматериала на основе теоретических представлений (например, модель Друде для металла и уравнения Лоренца для диэлектриков). Важно учитывать параметры затухания, плазменные частоты и другие характеристики, которые определяют оптическое поведение материалов в выбранном диапазоне длин волн. Этот этап включает написание функций для расчёта комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей, которые могут быть использованы в дальнейших вычислениях.

На третьем этапе разрабатывается модель эффективной среды с применением приближения Максвелл–Гарнетта. Здесь формулируются выражения для эффективной диэлектрической проницаемости в двух перпендикулярных направлениях (поперечном и продольном) и эффективной магнитной проницаемости, что позволяет учесть анизотропные свойства композита. Этот шаг требует учёта объёмной доли включений и корректного выбора параметров для формул Максвелл–Гарнетта, что позволяет получить эффективные параметры композита. Расчёт эффективного показателя преломления и поверхностного импеданса плёнок является ключевым результатом данного этапа.

Далее происходит формирование базы для численных расчётов, где реализуются функции для вычисления указанных параметров. На этом этапе создаются функции для расчёта эффективных параметров композита, а также функции для поверхностного импеданса, которые основываются на ранее полученных выражениях для диэлектрической и магнитной проницаемости. Проверка корректности функций происходит с использованием тестовых значений, что позволяет убедиться в их стабильности и точности.

Следующий этап предполагает настройку пользовательских параметров, таких как диапазон длин волн излучения, углы падения излучения, объёмная доля включений и толщина нанокомпозитной плёнки. Эти параметры задают условия для конкретных вычислений и визуализации, что позволяет адаптировать программу для различных сценариев моделирования. На этом этапе также проводится подготовка данных для последующего анализа — например, создание массивов для хранения результатов расчётов в зависимости от изменения параметров.

На шестом этапе происходит расчёт оптических характеристик композитной плёнки по заданным параметрам, включая эффективные диэлектрическую и магнитную проницаемости, показатель преломления и поверхностный импеданс. Здесь применяются методы численного моделирования для получения коэффициентов Френеля, которые позволяют оценить отражение, пропускание и поглощение света на границе сред. Включение матричного метода для расчёта характеристик плёнки на подложке является важной частью этого этапа и требует точного учёта граничных условий и фазовых сдвигов.

Параллельно с численным расчётом физических параметров происходит анализ дисперсионных характеристик нанокомпозита, который включает исследование изочастотных поверхностей в пространстве волновых векторов. Это позволяет определить области гиперболического режима, где материал проявляет уникальные оптические свойства, такие как суперфокусировка и направленное излучение. Графическое представление этих зависимостей в k-пространстве позволяет наглядно оценить области с гиперболической дисперсией.

После получения численных данных проводится визуализация результатов, которая

включает построение двумерных, трёхмерных и контурных графиков, отображающих зависимость коэффициентов отражения, пропускания и поглощения от длины волны и угла падения. Визуализация также включает построение спектров эффективных параметров, что позволяет более наглядно оценить поведение метаматериала в выбранном диапазоне длин волн. Этот этап важен для интерпретации результатов и их использования в дальнейших экспериментах или теоретических исследованиях.

Завершающим этапом является проверка и оптимизация модели, где результаты расчётов сравниваются с экспериментальными данными или известными теоретическими моделями. Корректировка параметров модели (например, частот затухания, плазменных частот) позволяет улучшить согласие между расчётными и экспериментальными данными. На этом этапе также проводится анализ чувствительности параметров для выявления их влияния на оптические характеристики композита.

Компьютерная программа дополняется модулями сохранения и загрузки данных, что позволяет экспортировать результаты расчётов в удобные форматы для последующего анализа. Это также важно для автоматизации процессов моделирования и быстрого возврата к ранее проведённым расчётам.

Последним логическим шагом становится документирование и тестирование программы, что включает создание подробной документации с описанием используемых алгоритмов, физических моделей и параметров. Также важно добавить тесты для проверки корректности работы каждой функции, что позволяет избежать ошибок в будущем и облегчает модификацию программы под новые условия моделирования.

На каждом из этапов важно поддерживать логическую связь между физическими основаниями модели и алгоритмической реализацией, что позволяет получить надёжные и воспроизводимые результаты. Таким образом, программа становится мощным инструментом для исследования оптических свойств гиперболических метаматериалов и их применения в различных областях оптоэлектроники и фотоники.

На рис. 1 приведено изображение фрагмента компьютерной программы для численного расчёта оптических характеристик гиперболических метаматериалов.

На рис. 2 приведено изображение фрагмента компьютерной программы для численного расчёта оптических характеристик гиперболических метаматериалов.

Приведём подробное описание основных блоков разработанной программы для численных расчётов оптических характеристик гиперболических метаматериалов, реализованное в программном коде на языке программирования Python.

Блок физических констант открывает программу и задаёт фундаментальные параметры, необходимые для всех последующих вычислений. Здесь определяются скорость света в вакууме, магнитная и электрическая проницаемость вакуума, а также импеданс свободного пространства. Эти универсальные значения служат базой для всех инженерных расчётов в оптическом диапазоне и обеспечивают единый стандарт для сравнения с экспериментальными данными.

Раздел параметров материалов содержит специализированные функции для описания дисперсионных свойств компонентов метаматериала. Функция для серебра реализована на основе модели Друде с учётом экспериментальных данных Джонсона и Кристи [51], что позволяет точно воспроизвести его поведение в оптическом диапазоне. Для оксида алюминия используется многозвенная диэлектрическая модель, учитывающая резонансные переходы, причем все параметры приведены для настройки в нанометровом диапазоне. Эта часть кода отвечает за физическую корректность модели на микроуровне.

Блок эффективной магнитной проницаемости реализует в приближении эффективной среды специализированную модель для магнитных включений, где учитывается эффективная магнитная проницаемость в заданной геометрии композита. Здесь особое

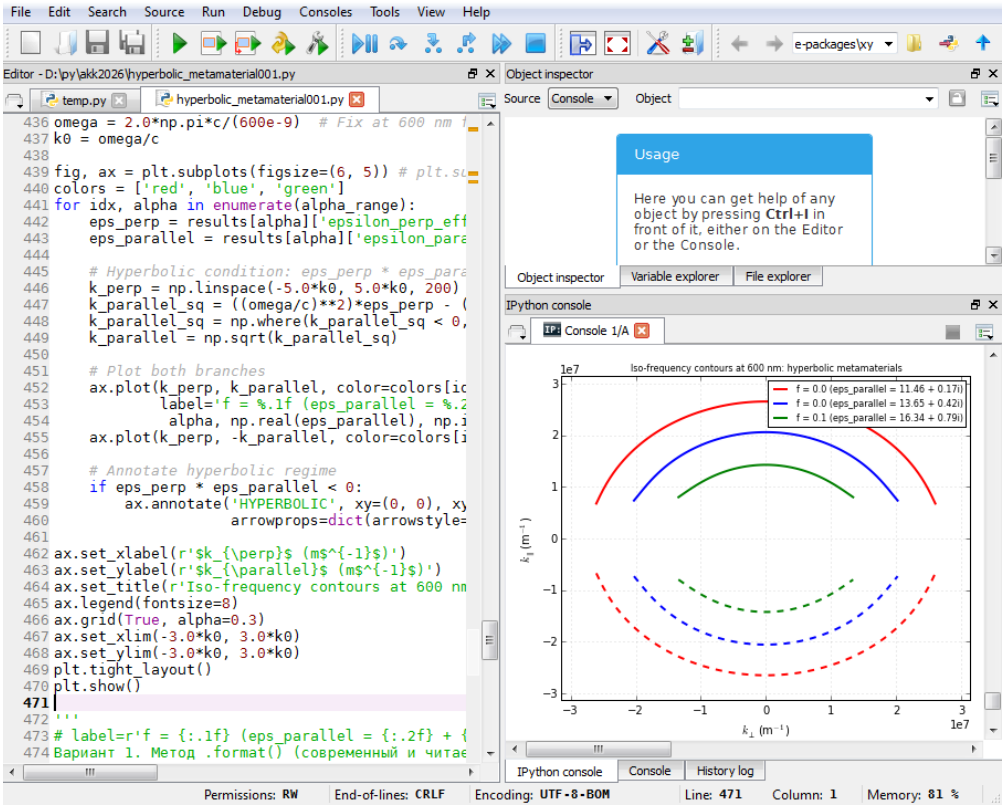


Рис. 1. Первый фрагмент компьютерной программы для численного расчёта оптических характеристик гиперболических метаматериалов.

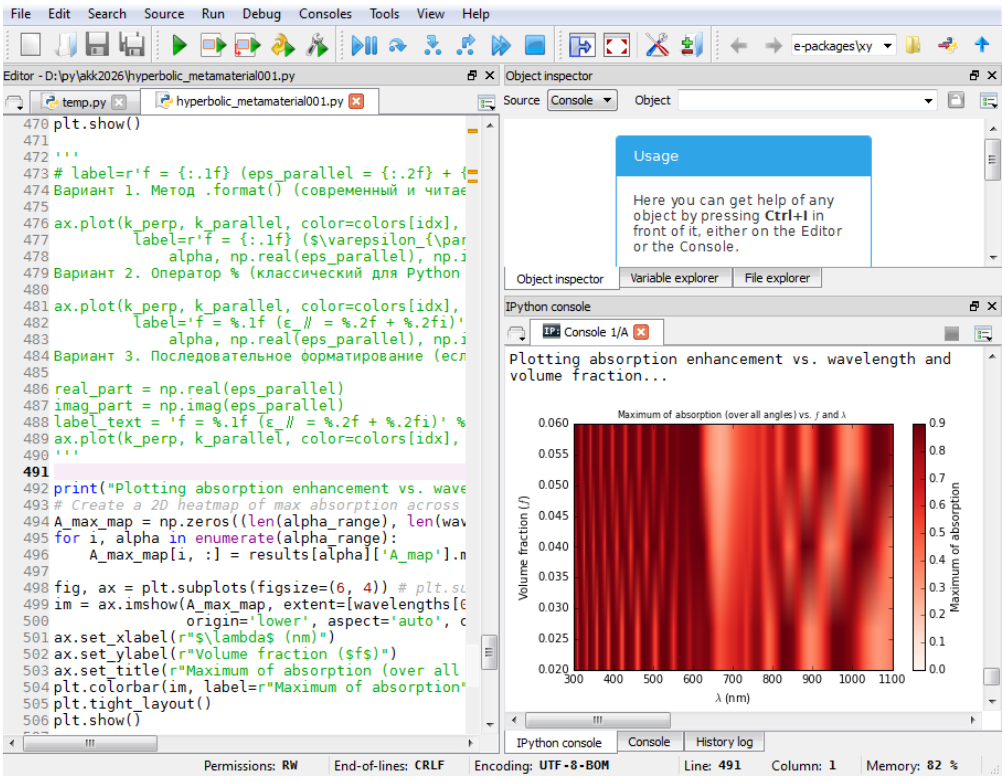


Рис. 2. Второй фрагмент компьютерной программы для численного расчёта оптических характеристик гиперболических метаматериалов.

внимание уделяется геометрическим параметрам — радиусам нанопроволок, зазорам между ними и периоду решётки, что позволяет учитывать пространственные эффекты в наноструктурированных материалах. Этот блок является уникальным для гиперболических метаматериалов и обеспечивает их специфическую анизотропию.

Блок приближения Максвелл–Гарнетта содержит три ключевые функции, реализующие эффективные свойства композитной среды. Функция для поперечной диэлектрической проницаемости учитывает влияние включений, ориентированных перпендикулярно направлению поля, в то время как функция для продольной компоненты описывает поведение вдоль включений. Для магнитной проницаемости используется аналогичный подход с учетом специфической магнитной модели включений. Эти функции математически связывают микроструктуру материала с его макроскопическими оптическими свойствами.

Модуль вычисления эффективных параметров объединяет предыдущие компоненты для формирования комплексных эффективных параметров метаматериала. Здесь рассчитывается геометрическое среднее для определения эффективного показателя преломления, который является важнейшей характеристикой для описания распространения света в такой среде. Параллельно вычисляется поверхностный импеданс, определяющий граничные условия на интерфейсах. Этот блок обеспечивает переход от микроскопического описания к макроскопическому, используя результаты предыдущих модулей.

Раздел численных расчетов с использованием матричного метода реализует алгоритм для вычисления коэффициентов Френеля с учётом конечной толщины плёнки и наличия подложки. Этот метод позволяет учитывать мультипольные отражения внутри плёнки и обеспечивает точное описание оптических свойств при косом падении. Здесь реализована полная процедура расчёта передаточной матрицы системы, включая границы раздела воздух-плёнка-подложка, что позволяет моделировать сложные оптические структуры с высокой точностью.

Подсистема визуализации комплексных величин предоставляет универсальный инструмент для анализа частотных зависимостей оптических параметров. Она позволяет одновременно анализировать действительную и мнимую части диэлектрической проницаемости, её модуль и фазу, что критично для понимания дисперсионных свойств метаматериала. Этот блок используется для оценки качества реализации моделей и их соответствия физическим ожиданиям.

Блок генерации карт Френеля создает двумерные, трёхмерные и контурные графики для визуализации отраженных, пропущенных и поглощенных компонент света. Эти представления позволяют наглядно оценить поведение метаматериала в различных условиях освещения и выявлять уникальные оптические эффекты, такие как суперфокусировка или направленное излучение. Карты служат важным инструментом для интерпретации результатов моделирования.

Блок численного анализа дисперсионных характеристик материальных параметров гиперболических метаматериалов реализует визуализацию изочастотных поверхностей в пространстве волновых векторов, что является ключевым для идентификации гиперболического режима материала. Этот модуль использует ранее вычисленные эффективные параметры гиперболических метаматериалов для построения диаграмм в k-пространстве и определению областей гиперболической дисперсии, где материал проявляет свои уникальные свойства. Построенные графики позволяют наглядно оценить условия, при которых материал переходит в гиперболический режим.

Подсистема параметрического анализа обеспечивает изучение зависимости оптических свойств от ключевых параметров модели. Здесь реализован расчет максимального поглощения в зависимости от объёмной доли включений и длины волны, что позво-

ляет оптимизировать структуру метаматериала для конкретных приложений. Карты зависимости служат важным инструментом для понимания чувствительности модели к изменению параметров и выбора оптимальных значений.

Блок документации и интерфейса содержит систему печатных сообщений, которые информируют пользователя о ходе выполнения программы и её завершения. Блок документации и интерфейса также предоставляет краткий обзор вычисленных характеристик, что важно для быстрой оценки результатов и планирования дальнейших исследований. Этот блок служит интерфейсом между численной моделью и пользователем, обеспечивая прозрачность процесса моделирования.

Блок управления параметрами координирует все компоненты компьютерной программы, обеспечивая взаимосвязь между различными модулями и настройку всех необходимых параметров. Здесь задаются диапазоны длин волн, углы падения, объёмные доли включений и другие ключевые параметры, которые определяют конкретный сценарий моделирования. Этот блок служит основой для адаптации программы к различным практическим задачам.

Каждый из этих блоков компьютерной программы логически связан с другими компонентами компьютерной программы и вносит вклад в комплексное моделирование оптических свойств гиперболических метаматериалов, обеспечивая переход от микроскопического описания к макроскопическому поведению всей структуры. Взаимодействие этих модулей позволяет проводить сложное численное моделирование с последующим анализом и визуализацией результатов численного моделирования оптических процессов плёнках из гиперболического метаматериала для оптического спектрального диапазона.

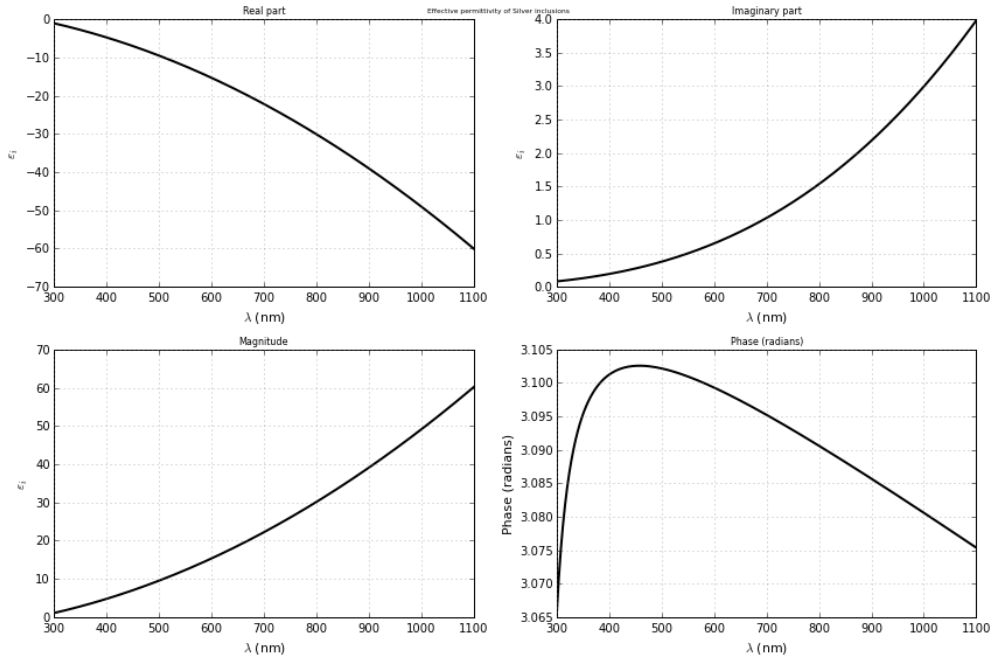


Рис. 3. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы диэлектрической проницаемости включений в гиперболических метаматериалах.

На рис. 3 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы диэлектрической проницаемости включений в гиперболических метаматериалах.

На рис. 4 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы поперечной эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.02$.

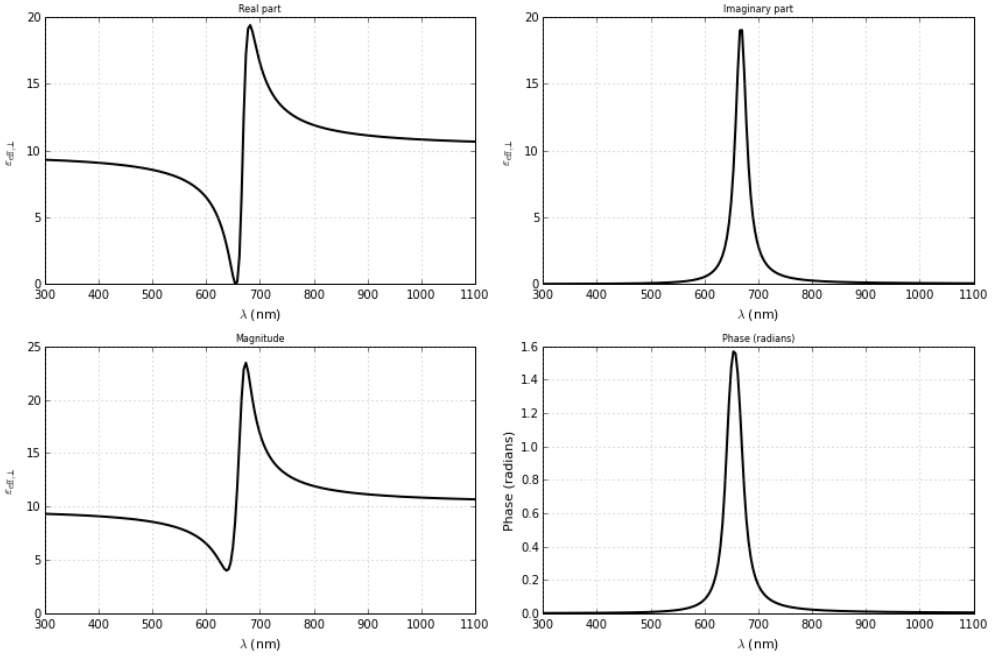


Рис. 4. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы поперечной эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.02$.

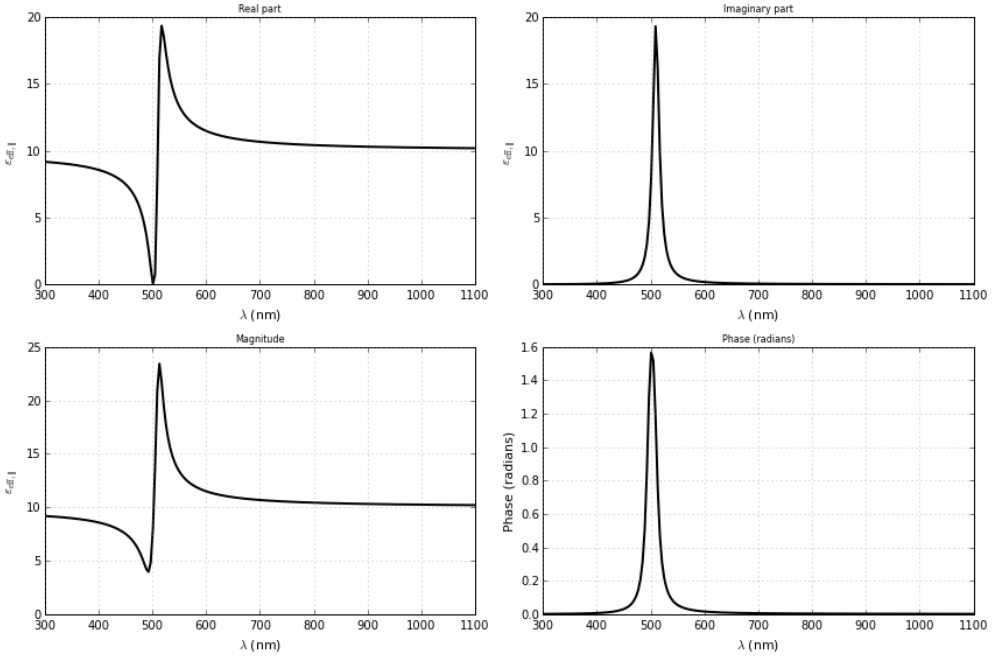


Рис. 5. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы продольной эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.02$.

На рис. 5 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы продольной эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.02$.

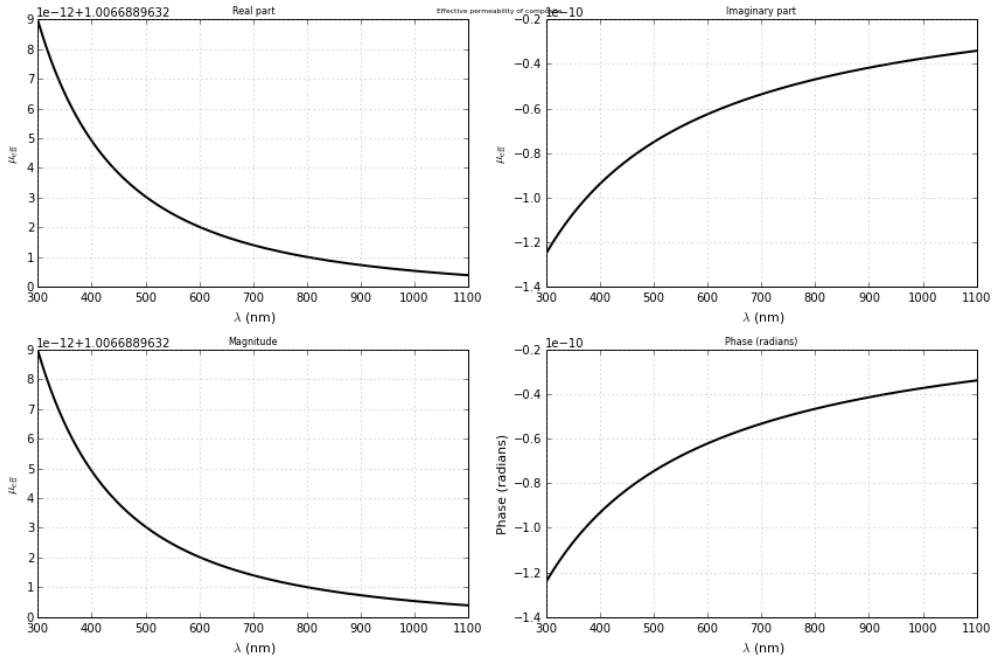


Рис. 6. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективной магнитной проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.02$.

На рис. 6 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективной магнитной проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.02$.

На рис. 7 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективного показателя преломления нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.02$.

На рис. 8 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективного поверхностного импеданса нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.02$.

На рис. 9 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы поперечной эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.04$.

На рис. 10 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы продольной эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.04$.

На рис. 11 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективной магнитной проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.04$.

На рис. 12 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективного показателя преломления нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.04$.

На рис. 13 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективного поверхностного импеданса нанокомпозита

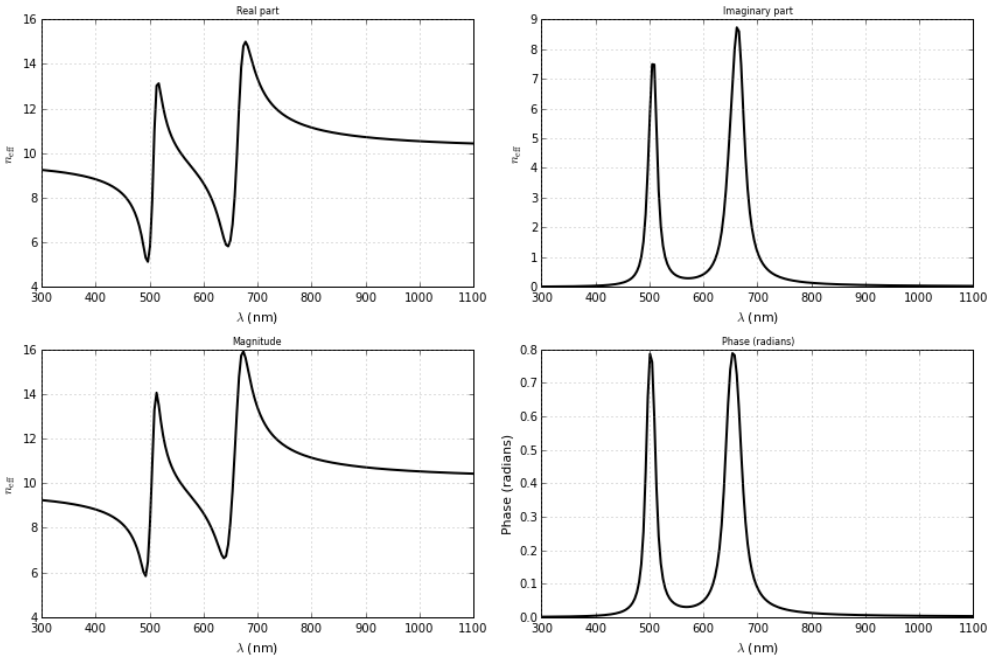


Рис. 7. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективного показателя преломления нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.02$.

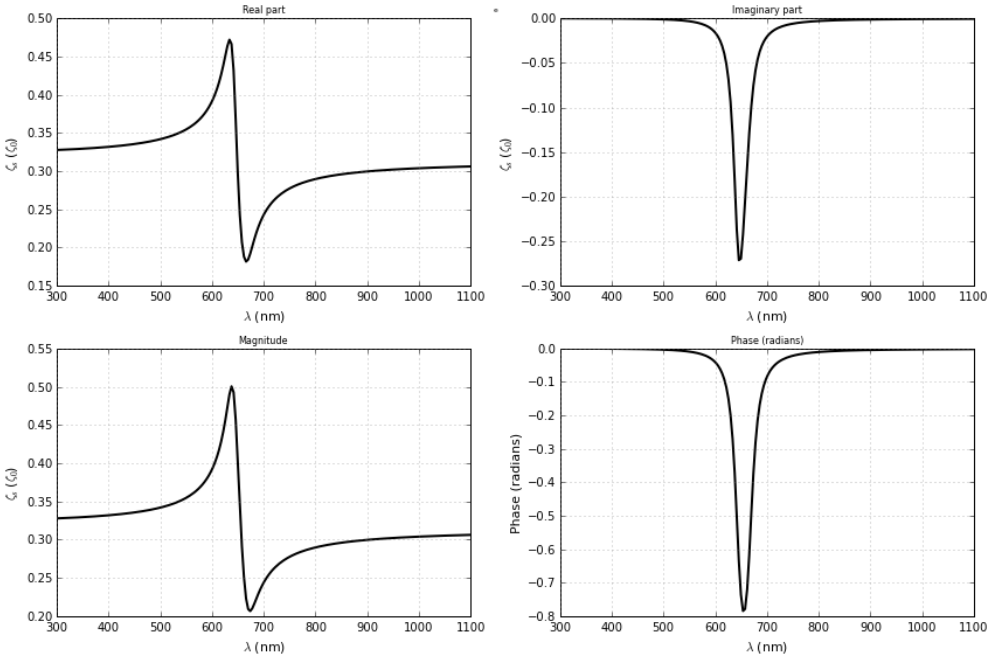


Рис. 8. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективного поверхностного импеданса нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.02$.

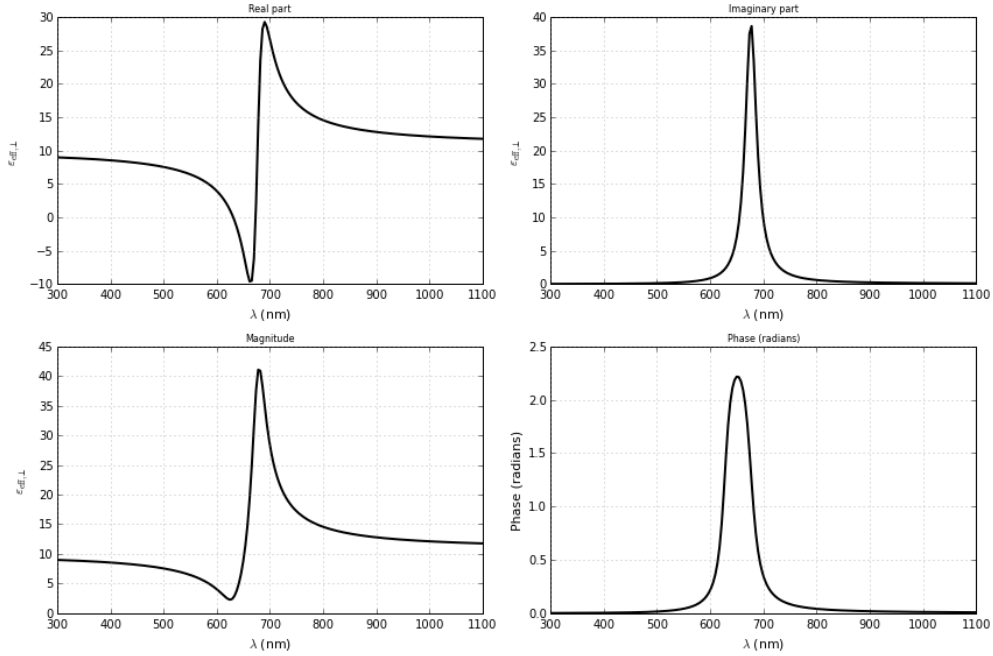


Рис. 9. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы поперечной эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.04$.

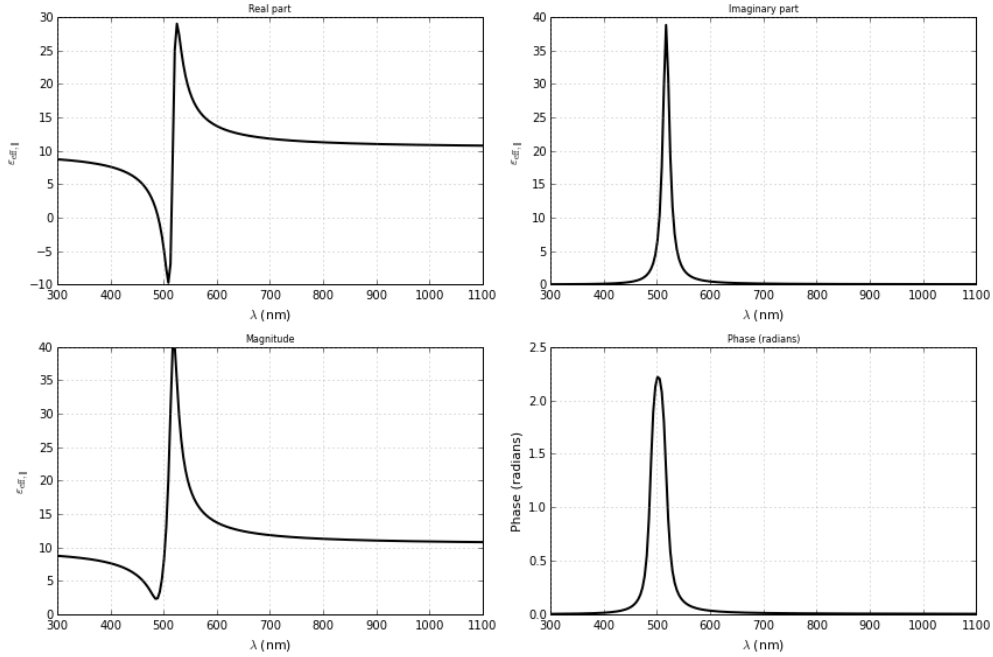


Рис. 10. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы продольной эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.04$.

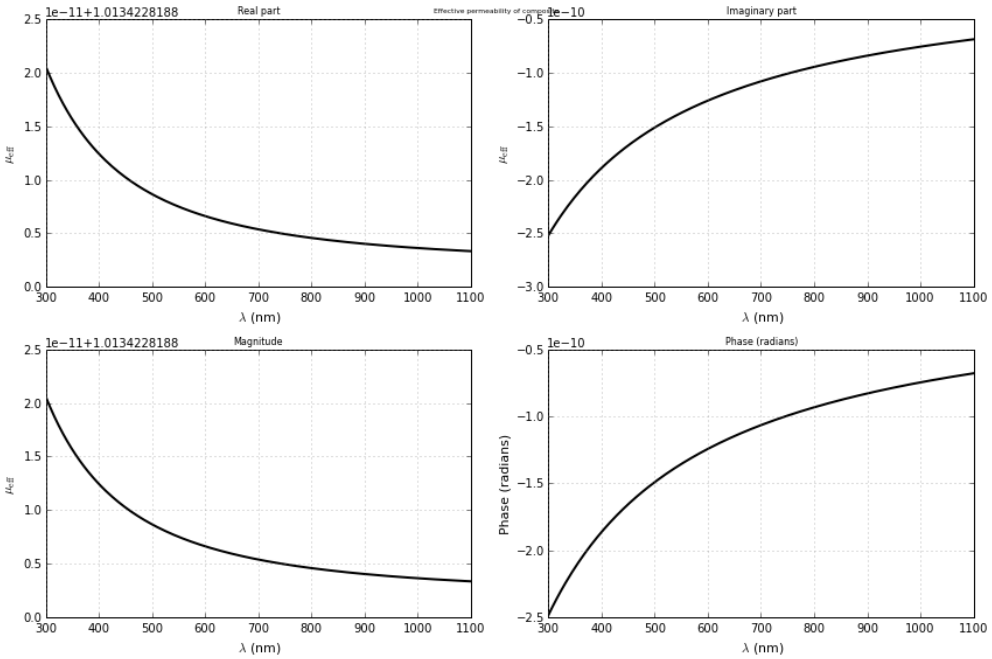


Рис. 11. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективной магнитной проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.04$.

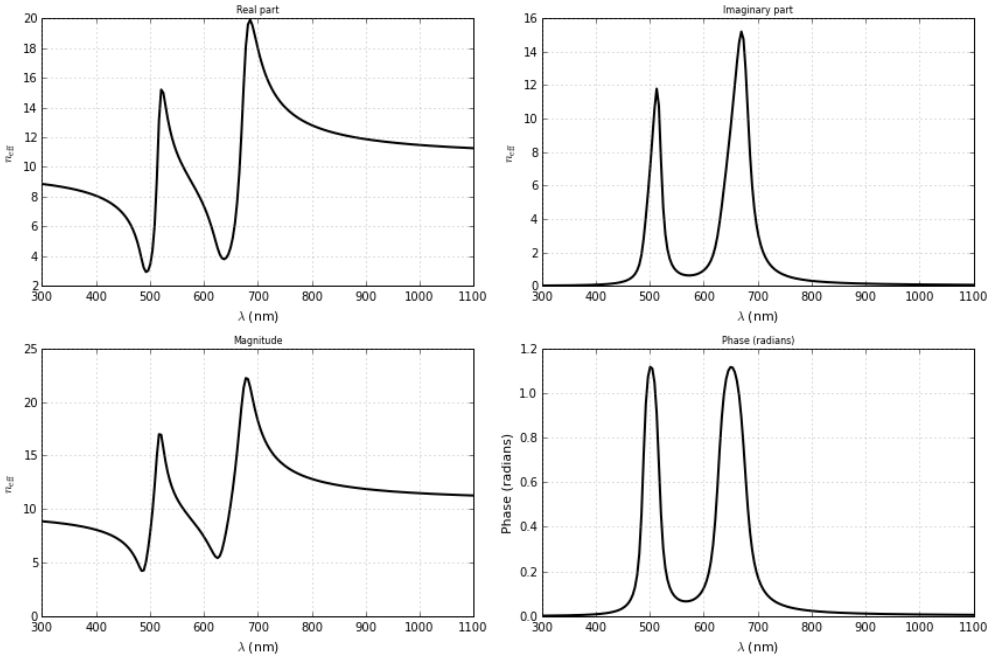


Рис. 12. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективного показателя преломления нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.04$.

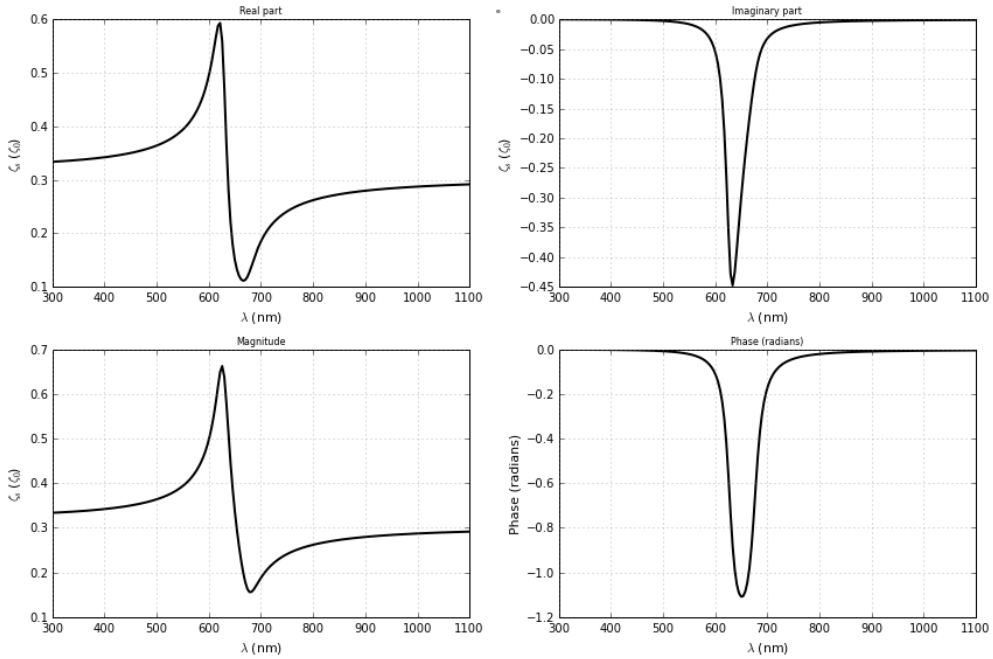


Рис. 13. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективного поверхностного импеданса нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.04$.

из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.04$.

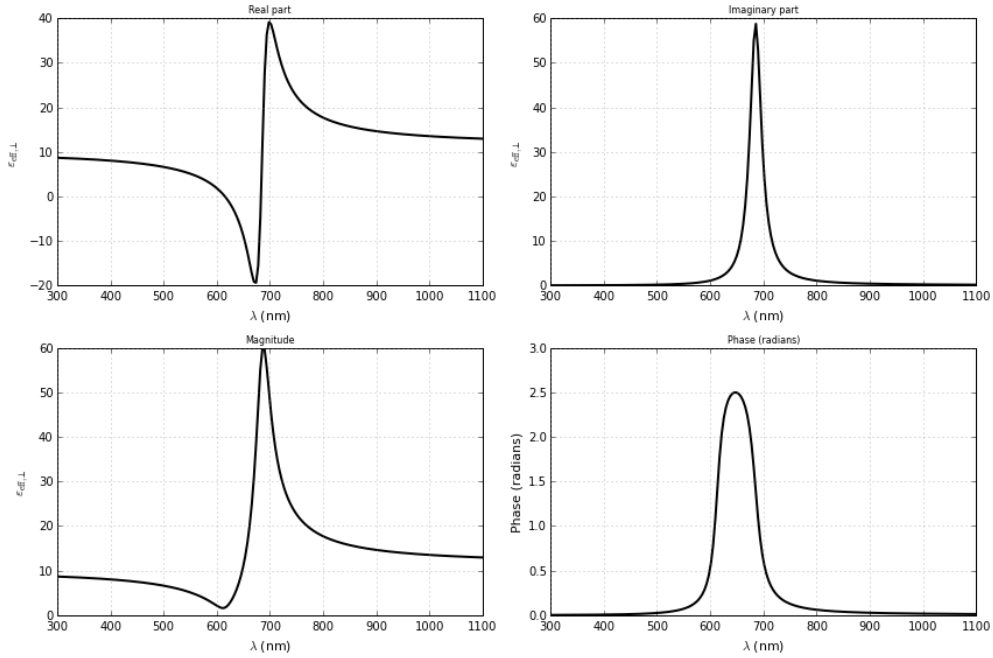


Рис. 14. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы поперечной эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.06$.

На рис. 14 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы поперечной эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.06$.

На рис. 15 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти,

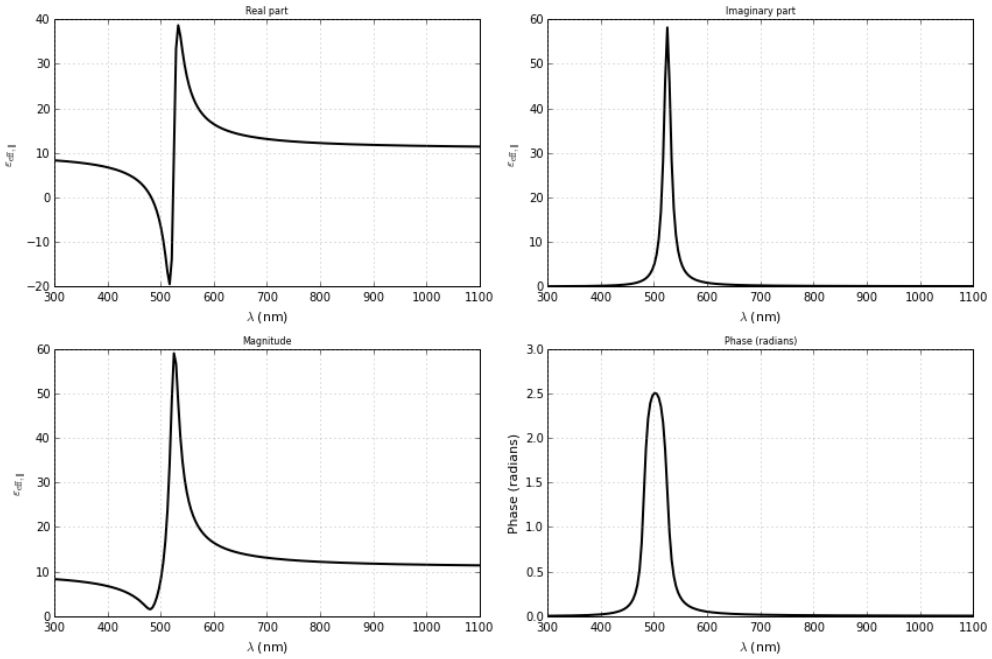


Рис. 15. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы продольной эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.06$.

мнимой части, модуля, фазы продольной эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.06$.

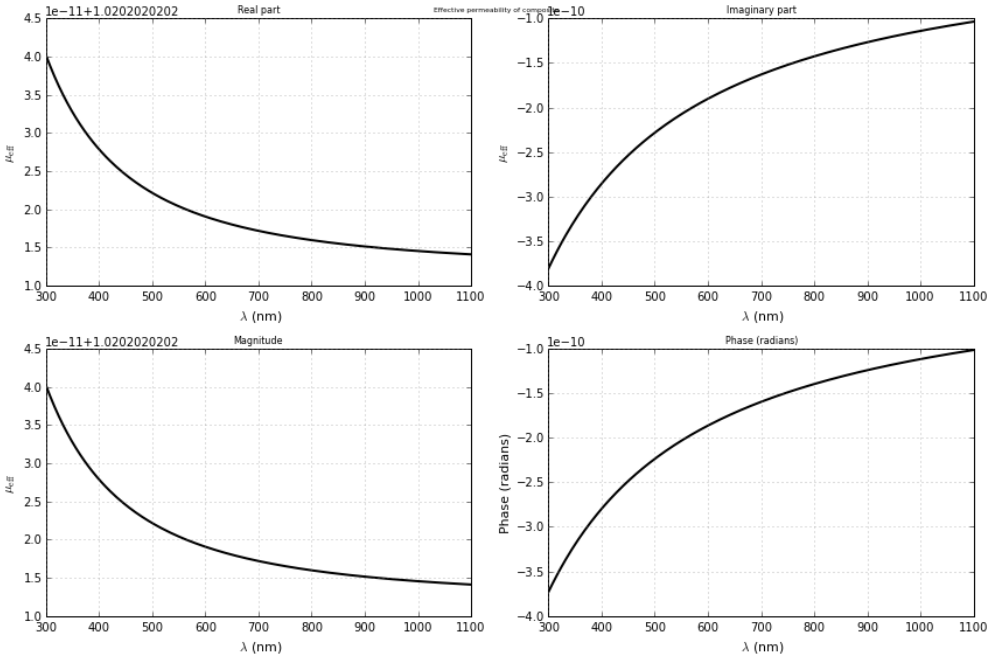


Рис. 16. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективной магнитной проницаемости нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.06$.

На рис. 16 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективной магнитной проницаемости нанокомпозита

из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.06$.

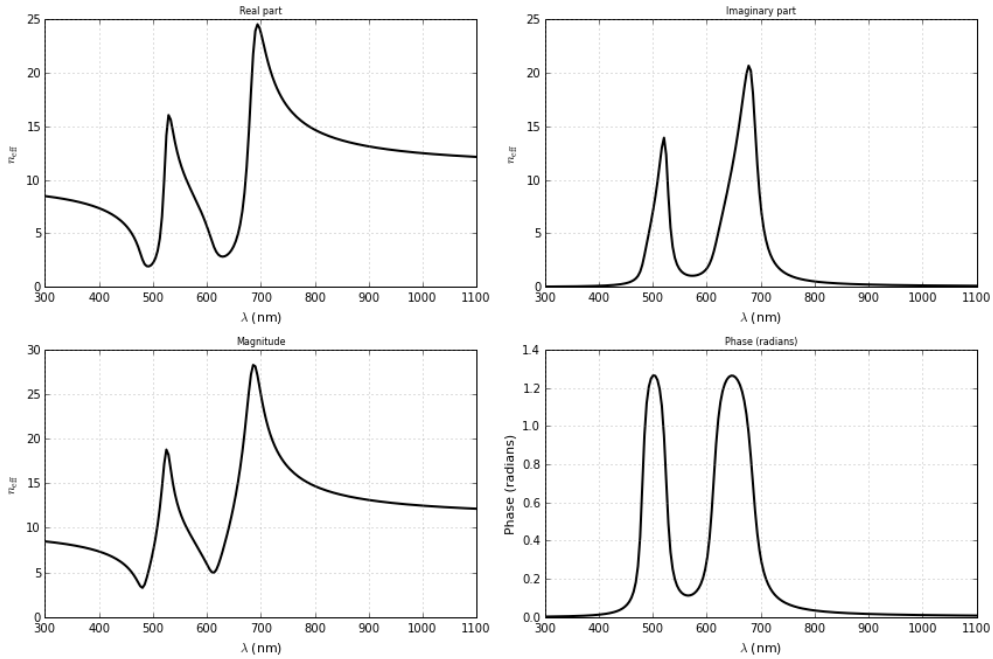


Рис. 17. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективного показателя преломления нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.06$.

На рис. 17 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективного показателя преломления нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.06$.

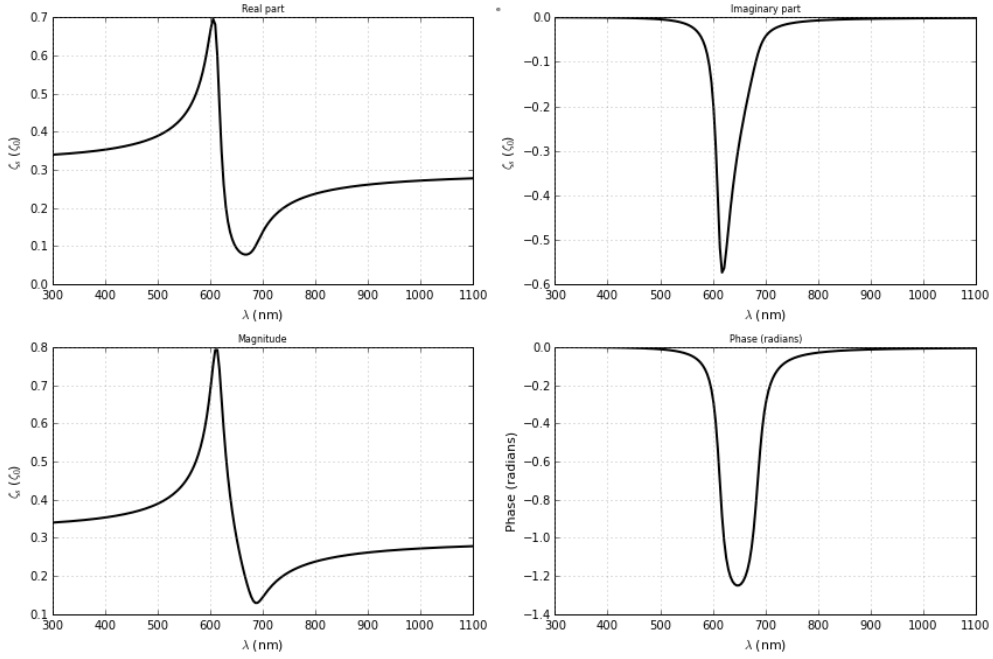


Рис. 18. Графики зависимостей действительной масти, мнимой части, модуля, фазы эффективного поверхностного импеданса нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.06$.

На рис. 18 приведено изображение графиков зависимостей действительной масти,

мнимой части, модуля, фазы эффективного поверхностного импеданса нанокомпозита из гиперболических метаматериалах с фактором заполнения $f = 0.06$.

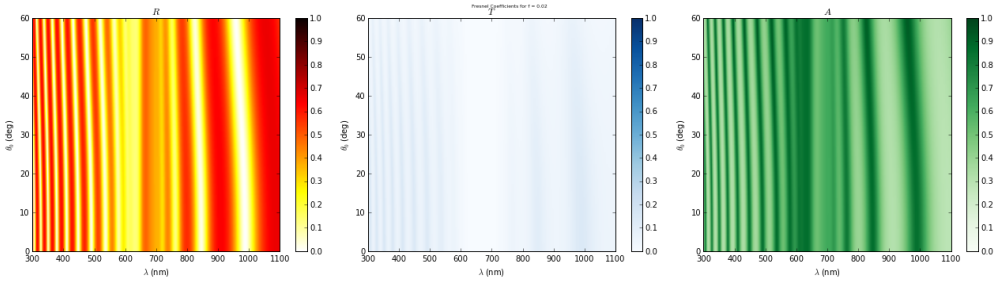


Рис. 19. Контурные графики зависимостей оптического отражения, пропускания и поглощения от плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750$ нм с фактором заполнения $f = 0.02$ от длины волны и угла падения оптического излучения.

На рис. 19 приведено изображение контурных графиков зависимостей оптического отражения, пропускания и поглощения от плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750$ нм с фактором заполнения $f = 0.02$ от длины волны и угла падения оптического излучения.

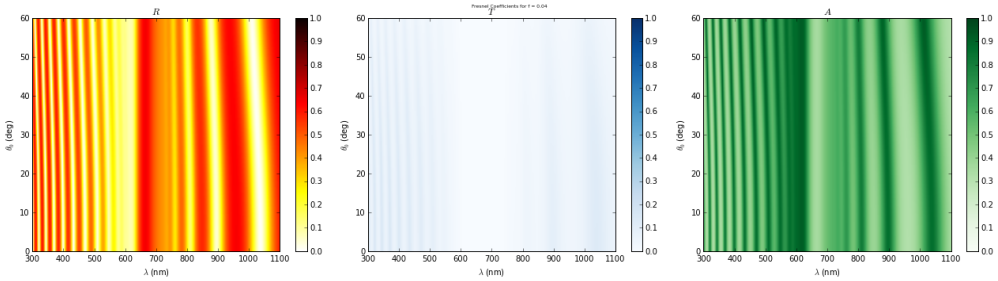


Рис. 20. Контурные графики зависимостей оптического отражения, пропускания и поглощения от плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750$ нм с фактором заполнения $f = 0.04$ от длины волны и угла падения оптического излучения.

На рис. 20 приведено изображение контурных графиков зависимостей оптического отражения, пропускания и поглощения от плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750$ нм с фактором заполнения $f = 0.04$ от длины волны и угла падения оптического излучения.

На рис. 21 приведено изображение контурных графиков зависимостей оптического отражения, пропускания и поглощения от плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750$ нм с фактором заполнения $f = 0.06$ от длины волны и угла падения оптического излучения.

На рис. 22 приведено изображение графиков поверхностей для зависимостей оптического отражения, пропускания и поглощения от плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750$ нм с фактором заполнения $f = 0.02$ от длины волны и угла падения оптического излучения.

На рис. 23 приведено изображение графиков поверхностей для зависимостей оптического отражения, пропускания и поглощения от плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750$ нм с фактором заполнения $f = 0.04$ от длины волны и угла падения оптического излучения.

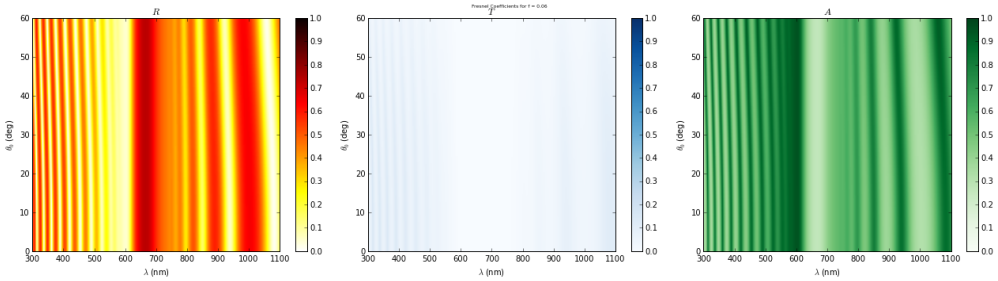


Рис. 21. Контурные графики зависимостей оптического отражения, пропускания и поглощения от плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750$ нм с фактором заполнения $f = 0.06$ от длины волны и угла падения оптического излучения.

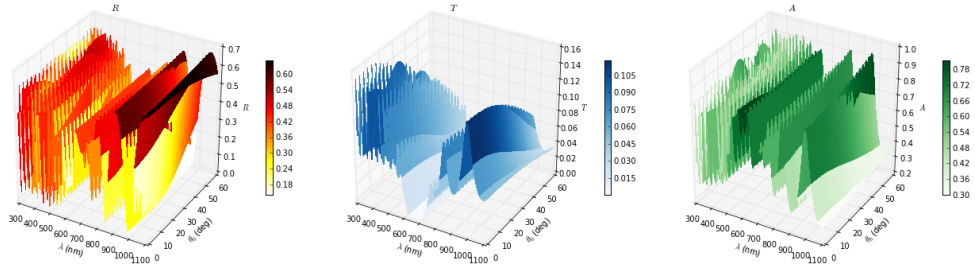


Рис. 22. Графики поверхностей для зависимостей оптического отражения, пропускания и поглощения от плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750$ нм с фактором заполнения $f = 0.02$ от длины волны и угла падения оптического излучения.

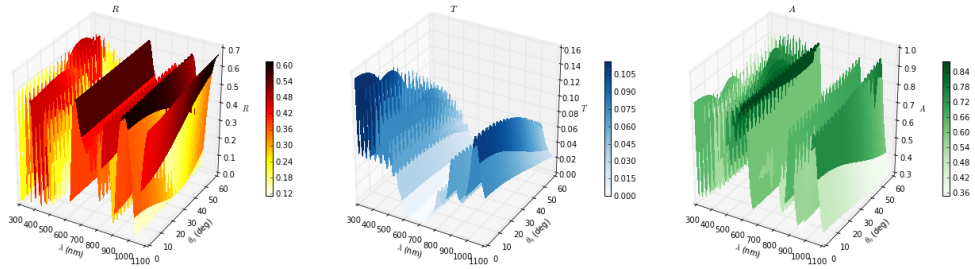


Рис. 23. Графики поверхностей для зависимостей оптического отражения, пропускания и поглощения от плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750$ нм с фактором заполнения $f = 0.04$ от длины волны и угла падения оптического излучения.

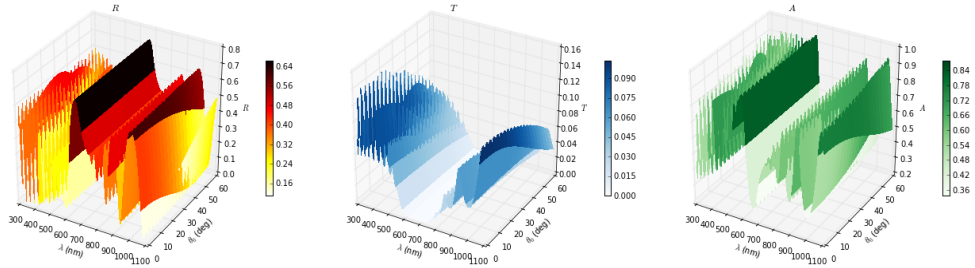


Рис. 24. Графики поверхностей для зависимостей оптического отражения, пропускания и поглощения от плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750$ нм с фактором заполнения $f = 0.06$ от длины волны и угла падения оптического излучения.

На рис. 24 приведено изображение графиков поверхностей для зависимостей оптического отражения, пропускания и поглощения от плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750\,\text{нм}$ с фактором заполнения $f = 0.06$ от длины волны и угла падения оптического излучения.

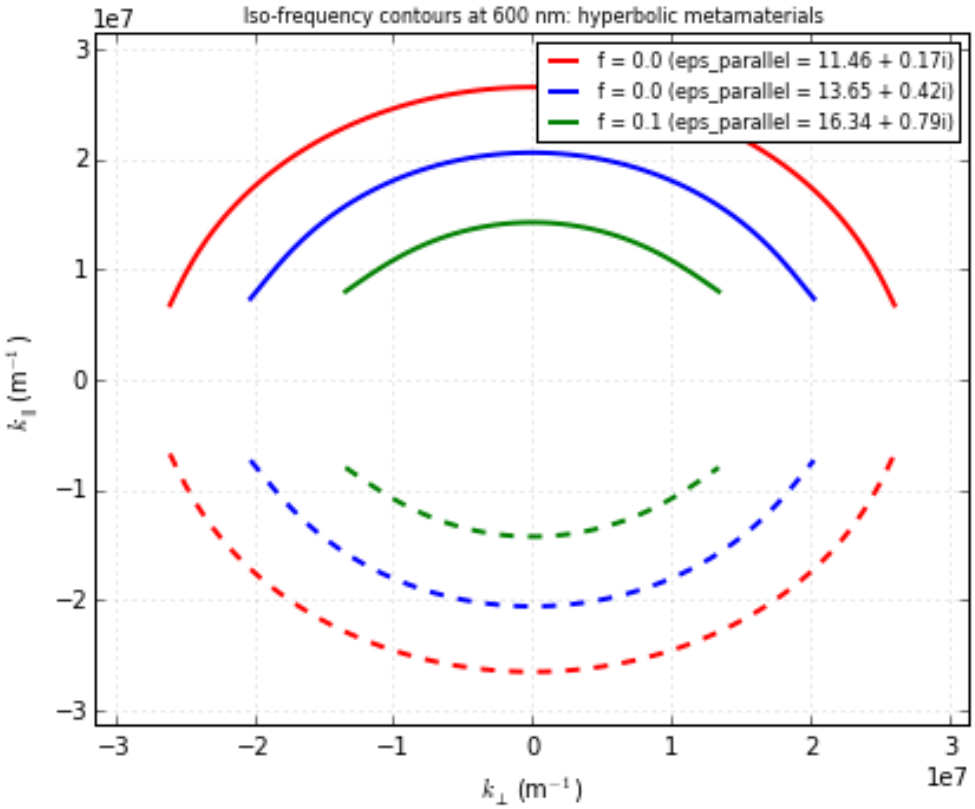


Рис. 25. Изолинии k-диаграмм для плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750\,\text{нм}$ при длине волны $\lambda = 600\,\text{нм}$.

На рис. 25 приведено изображение изолиний k-диаграмм для плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750\,\text{нм}$ при длине волны $\lambda = 600\,\text{нм}$.

На рис. 26 приведено изображение контурного графика максимального оптического поглощения плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750\,\text{нм}$ от фактора заполнения и длины волны излучения.

Компьютерная программа демонстрирует эффективность использования приближения Максвелл–Гарнетта для описания электромагнитных свойств нанокомпозитов на основе серебра в матрице оксида алюминия (Al_2O_3), что позволяет корректно моделировать анизотропные диэлектрические и магнитные характеристики гиперболических метаматериалов в оптическом диапазоне. Расчёты показывают, что эффективная продольная и поперечная диэлектрические проницаемости нанокомпозита сильно зависят от объёмной доли нановключений, проявляя как металлическую, так и диэлектрическую дисперсию в зависимости от длины волны излучения. Особое внимание заслуживает гиперболический режим, когда произведение продольной и поперечной диэлектрических проницаемостей становится отрицательным ($\varepsilon_\perp \varepsilon_\parallel < 0$). Это подтверждается визуализацией изочастотных поверхностей в k-пространстве, где наблюдаются характерные ветвящиеся конусы, типичные для гиперболических метаматериалов. Такой режим открывает возможности для суперфокусировки света, подавления поверхностных плазмонных потерь и создания структур с уникальными направленными характеристиками излучения.

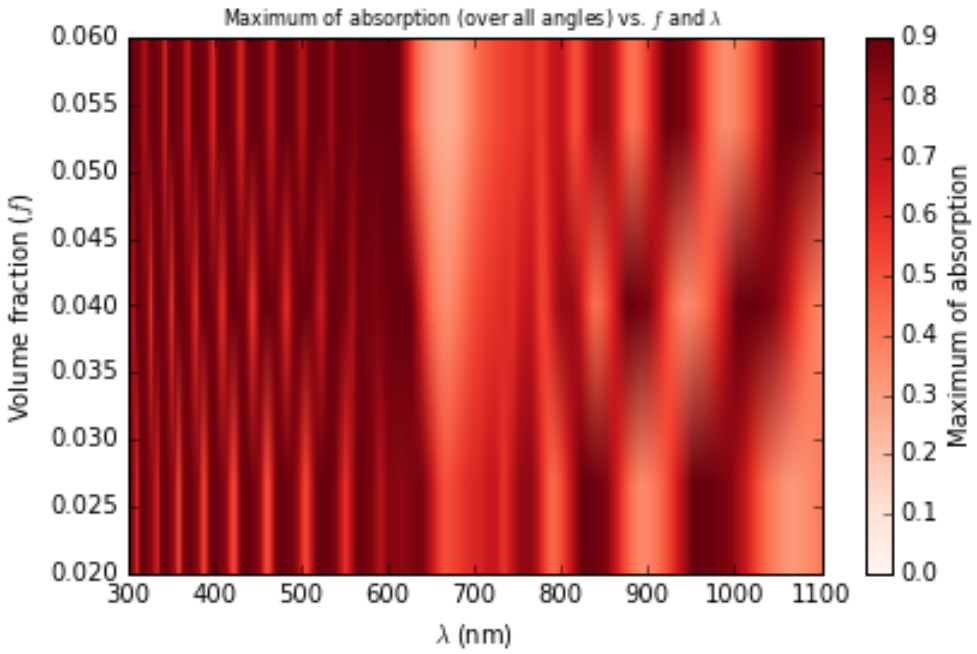


Рис. 26. Контурный график максимального оптического поглощения плёнки нанокомпозита из гиперболических метаматериалах толщиной $d = 750$ нм от фактора заполнения и длины волны излучения.

Анализ коэффициентов Френеля для оптического отражения R, пропускания T и поглощения A в зависимости от угла падения и длины волны излучения выявил нелинейные зависимости, обусловленные анизотропией эффективных параметров. Так, при увеличении объёмной доли металлических включений наблюдается рост поглощения в определённых спектральных диапазонах, что подтверждается картами максимального поглощения. Это позволяет оптимизировать структуру метаматериала для приложений в сенсорике, солнечной энергетике и оптоэлектронных устройствах на основе метаматериала.

Определение эффективного показателя преломления через геометрическое среднее продольной и поперечной диэлектрических проницаемостей показало его сильную дисперсию, что согласуется с экспериментальными данными для подобных систем. Поверхностный импеданс, рассчитанный как функция длины волны и угла падения, является ключевым параметром для описания граничных условий в таких структурах и может использоваться в задачах проектирования метаповерхностей.

Визуализация результатов в виде двумерных карт, трёхмерных поверхностей и контурных графиков обеспечивает интуитивное понимание многообразия оптических режимов, доступных в гиперболических метаматериалах. Например, карты Френеля демонстрируют режим аномально высокого пропускания в определённых спектральных окнах, что может быть полезно для разработки оптических фильтров и световодов нового поколения.

Таким образом, представленная компьютерная программа является мощным инструментом для численного проектирования гиперболических метаматериалов, позволяющим связать их микроструктурные параметры (геометрия нановключений, объёмные доли) с макроскопическими оптическими свойствами. Результаты работы служат основой для дальнейших исследований в области планарной оптики, квантовой электроники и фотоники метаматериалов, где гиперболические метаматериалы демонстрируют уникальные возможности по управлению потоком света на наноуровне.

Заключение

В работе проведено самосогласованное теоретическое и численное исследование оптических свойств гиперболических метаматериалов, а также численное моделирование оптических свойств плёнок гиперболического метаматериала в оптическом диапазоне. Получены аналитические выражения для эффективных параметров, показателя преломления и импеданса плёнки гиперболического метаматериала. Рассчитаны коэффициенты Френеля для плёнки на подложке. Рассчитаны эффективные параметры среды, показатель преломления, поверхностный импеданс и коэффициенты отражения, пропускания и поглощения.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. проанализированы оптические свойства гиперболических метаматериалов,
2. разработана электродинамическая модель гиперболических метаматериалов, учитывающая анизотропию, диссипацию и пространственную дисперсию, на основе которой получены аналитические выражения для тензора диэлектрической проницаемости, дисперсионных соотношений,
3. разработана численная модель оптических процессов в плёнках из гиперболического метаматериала, основанная на приближении Максвелл–Гарнетта,
4. проведены численные расчёты эффективных параметров среды таких, как показатель преломления, поверхностный импеданс, коэффициентов оптического отражения, пропускания, поглощения, подтвердившее корректность аналитических результатов,
5. показано, что гиперболические метаматериалы обладают уникальными оптическими свойствами: существованием k-мод с сверхвысокой плотностью фотонных состояний и сильным локальным усилением поля.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что уникальные дисперсионные свойства гиперболических метаматериалов, обусловленные гиперболической формой изочастотной поверхности, приводят к качественно новым, по сравнению с обычными средами, режимам оптического отражения и пропускания, включая эффекты отрицательного рефракции, резкой угловой селективности и усиления ближнего поля, подтверждена полностью.

Задачи работы решены полностью.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании нового поколения оптических наноприборов, метаоптических устройств и сенсоров с заданными физическими характеристиками. В дальнейшем планируется расширение модели для учёта многослойных структур, исследование нелинейных эффектов и разработка методов синтеза гиперболических метаматериалов с заданными физическими свойствами.

Список использованных источников

1. Davidovich M. V. Hyperbolic metamaterials: production, properties, applications, and prospects // Physics-Uspekhi. — 2019. — dec. — Vol. 62, no. 12. — P. 1173–1207. — URL: http://dx.doi.org/10.3367/ufne.2019.08.038643.

2. Hyperbolic metamaterials and metasurfaces: fundamentals and applications / Pengcheng Huo [et al.] // Advanced optical materials. — 2019. — apr. — Vol. 7, no. 14. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/adom.201801616.

3. Hyperbolic metamaterials and their applications / Lorenzo Ferrari [et al.] // Progress in Quantum Electronics. — 2015. — mar. — Vol. 40. — P. 1–40. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.pquantelec.2014.10.001.

4. Shekhar Prashant, Atkinson Jonathan, Jacob Zubin. Hyperbolic metamaterials: fundamentals and applications // Nano convergence. — 2014. — june. — Vol. 1, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1186/s40580-014-0014-6.

5. Engineering transient hyperbolic metamaterials using InAsSb-based semiconductor / H. J. Haugan [et al.] // AIP Advances. — 2021. — july. — Vol. 11, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0040294.

6. Yan Wei, Wubs Martijn, Mortensen N. Asger. Hyperbolic metamaterials: nonlocal response regularizes broadband supersingularity // Physical Review B. — 2012. — nov. — Vol. 86, no. 20. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.205429.

7. Subwavelength optics with hyperbolic metamaterials: waveguides, scattering, and optical topological transitions / Satoshi Ishii [et al.] // 2016 18th International conference on transparent optical networks (ICTON). — IEEE, 2016. — july. — P. 1–4. — URL: http://dx.doi.org/10.1109/icton.2016.7550461.

8. Anomalously weak scattering in metal-semiconductor multilayer hyperbolic metamaterials / Hao Shen [et al.] // Physical Review X. — 2015. — may. — Vol. 5, no. 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/physrevx.5.021021.

9. Loss-compensated and active hyperbolic metamaterials / Xingjie Ni [et al.] // Optics Express. — 2011. — nov. — Vol. 19, no. 25. — P. 25242. — URL: http://dx.doi.org/10.1364/oe.19.025242.

10. Ballantine K. E., Donegan J. F., Eastham P. R. Conical diffraction and the dispersion surface of hyperbolic metamaterials // Physical Review A. — 2014. — july. — Vol. 90, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.90.013803.

11. Broadband acoustic hyperbolic metamaterial / Chen Shen [et al.] // Physical Review Letters. — 2015. — dec. — Vol. 115, no. 25. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.254301.

12. Shekhar Prashant, Jacob Zubin. Strong coupling in hyperbolic metamaterials // Physical Review B. — 2014. — july. — Vol. 90, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.90.045313.

13. Hyperbolic metamaterials with Bragg polaritons / Evgeny S. Sedov [et al.] // Physical Review Letters. — 2015. — june. — Vol. 114, no. 23. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.237402.

14. Smolyaninov Igor I. Analog of gravitational force in hyperbolic metamaterials // Physical Review A. — 2013. — sept. — Vol. 88, no. 3. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.88.033843.

15. Self-induced torque in hyperbolic metamaterials / Pavel Ginzburg [et al.] // Physical Review Letters. — 2013. — july. — Vol. 111, no. 3. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.036804.

16. Casimir force between hyperbolic metamaterials / Ge Song [et al.] // Physical Review A. — 2017. — feb. — Vol. 95, no. 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.95.023814.

17. Optical pulling forces in hyperbolic metamaterials / Alexander S. Shalin [et al.] // Physical Review A. — 2015. — june. — Vol. 91, no. 6. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.91.063830.

18. Purcell effect in hyperbolic metamaterial resonators / Alexey P. Slobozhanyuk [et al.] // Physical Review B. — 2015. — Nov. — Vol. 92. — P. 195127. — URL: https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.92.195127.

19. Topological photonic phase in chiral hyperbolic metamaterials / Wenlong Gao [et al.] // Physical Review Letters. — 2015. — jan. — Vol. 114, no. 3. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.037402.

20. Biehs S. A., Tschikin M., Ben-Abdallah P. Hyperbolic metamaterials as an analog of a blackbody in the near field // Physical Review Letters. — 2012. — sept. — Vol. 109, no. 10. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.104301.

21. Radiative thermal diode via hyperbolic metamaterials / Qizhang Li [et al.] // Physical Review Applied. — 2021. — dec. — Vol. 16, no. 6. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.064022.

22. Microscopic model of Purcell enhancement in hyperbolic metamaterials / Alexander N. Poddubny [et al.] // Physical Review B. — 2012. — july. — Vol. 86, no. 3. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.035148.

23. Compton-like polariton scattering in hyperbolic metamaterials / Ivan V. Iorsh [et al.] // Physical Review Letters. — 2015. — may. — Vol. 114, no. 18. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.185501.

24. Papadakis Georgia T., Atwater Harry A. Field-effect induced tunability in hyperbolic metamaterials // Physical Review B. — 2015. — nov. — Vol. 92, no. 18. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.92.184101.

25. Hyperbolic metamaterials based on multilayer graphene structures / Ivan V. Iorsh [et al.] // Physical Review B. — 2013. — feb. — Vol. 87, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.87.075416.

26. High-frequency homogenization for layered hyperbolic metamaterials / A. A. Krokhin [et al.] // Physical Review B. — 2016. — feb. — Vol. 93, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.93.075418.

27. Mirmoosa M. S., Kosulnikov S. Yu., Simovski C. R. Magnetic hyperbolic metamaterial of high-index nanowires // Physical Review B. — 2016. — aug. — Vol. 94, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.94.075138.

28. Anomalous resonances of an optical microcavity with a hyperbolic metamaterial core / Evgenij Travkin [et al.] // Physical Review B. — 2018. — may. — Vol. 97, no. 19. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.97.195133.

29. Miniaturizing optical antennas using hyperbolic metamaterial wires / Rafik Smaali [et al.] // Physical Review B. — 2017. — apr. — Vol. 95, no. 15. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.95.155306.

30. Photonic Chern insulators made of gyromagnetic hyperbolic metamaterials / Ruei-Cheng Shiu [et al.] // Physical Review Materials. — 2020. — june. — Vol. 4, no. 6. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.4.065202.

31. Vaianella Fabio, Maes Bjorn. Fano resonance engineering in slanted cavities with hyperbolic metamaterials // Physical Review B. — 2016. — sept. — Vol. 94, no. 12. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.94.125442.

32. Poddubny Alexander N., Iorsh Ivan V., Sukhorukov Andrey A. Generation of photon-plasmon quantum states in nonlinear hyperbolic metamaterials // Physical Review Letters. — 2016. — sept. — Vol. 117, no. 12. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.123901.

33. Anomalously weak scattering in metal-semiconductor multilayer hyperbolic metamaterials / Hao Shen [et al.] // Physical Review X. — 2015. — may. — Vol. 5, no. 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/physrevx.5.021021.

34. Zhang Yang, Zheng Li-Yang, Christensen Johan. Defect-immune sound radiation in a topologically nontrivial hyperbolic metamaterial // Physical Review Letters. — 2025. — apr. — Vol. 134, no. 15. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.156602.

35. Second-harmonic double-resonance cones in dispersive hyperbolic metamaterials / Domenico de Ceglia [et al.] // Physical Review B. — 2014. — feb. — Vol. 89, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.075123.

36. Pustovit Vitaliy N., Urbas Augustine M., Zelmon David E. Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation in hyperbolic metamaterials // Physical Review B. — 2016. — dec. — Vol. 94, no. 23. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.94.235445.

37. Miller Owen D., Johnson Steven G., Rodriguez Alejandro W. Effectiveness of thin films in lieu of hyperbolic metamaterials in the near field // Physical Review Letters. — 2014. — apr. — Vol. 112, no. 15. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.157402.

38. Hyperbolic metamaterial nanoresonators make poor single-photon sources / Simon Axelrod [et al.] // Physical Review B. — 2017. — apr. — Vol. 95, no. 15. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.95.155424.

39. Dispersionless gaps and cavity modes in photonic crystals containing hyperbolic metamaterials / Chun-hua Xue [et al.] // Physical Review B. — 2016. — mar. — Vol. 93, no. 12. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.93.125310.

40. Magnetically tunable near-field radiative heat transfer in hyperbolic metamaterials / Jinlin Song [et al.] // Physical Review Applied. — 2020. — feb. — Vol. 13, no. 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.024054.

41. Giant photoresponsivity of midinfrared hyperbolic metamaterials in the photon-assisted-tunneling regime / Pai-Yen Chen [et al.] // Physical Review Applied. — 2016. — apr. — Vol. 5, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.5.041001.

42. Savoia Silvio, Castaldi Giuseppe, Galdi Vincenzo. Optical nonlocality in multilayered hyperbolic metamaterials based on Thue-Morse superlattices // Physical Review B. — 2013. — june. — Vol. 87, no. 23. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.87.235116.

43. Topological bands and triply degenerate points in non-Hermitian hyperbolic metamaterials / Junpeng Hou [et al.] // Physical Review Letters. — 2020. — feb. — Vol. 124, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.073603.

44. Sub-diffraction-limit imaging system with two interfacing hyperbolic metamaterials / Kirill Bronnikov [et al.] // Physical Review Applied. — 2021. — oct. — Vol. 16, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.044054.

45. Kidwai Omar, Zhukovsky Sergei V., Sipe J. E. Effective-medium approach to planar multilayer hyperbolic metamaterials: strengths and limitations // Physical Review A. — 2012. — may. — Vol. 85, no. 5. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.85.053842.

46. Guclu Caner, Campione Salvatore, Capolino Filippo. Hyperbolic metamaterial as super absorber for scattered fields generated at its surface // Physical Review B. — 2012. — nov. — Vol. 86, no. 20. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.205130.

47. Redshift gaps in one-dimensional photonic crystals containing hyperbolic metamaterials / Feng Wu [et al.] // Physical Review Applied. — 2018. — dec. — Vol. 10, no. 6. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.064022.

48. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity / D. R. Smith [et al.] // Physical Review Letters. — 2000. — May. — Vol. 84, no. 18. — P. 4184–4187. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4184.

49. Hyperbolic metamaterials / Alexander Poddubny [et al.] // Nature photonics. — 2013. — Nov. — Vol. 7, no. 12. — P. 948–957. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2013.243.

50. Jacob Zubin, Smolyaninov Igor I., Narimanov Evgenii E. Broadband Purcell effect: radiative decay engineering with metamaterials // Applied Physics Letters. — 2012. — Apr. — Vol. 100, no. 18. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.4710548.

51. Johnson P. B., Christy R. W. Optical constants of the Noble metals // Physical Review B. — 1972. — Dec. — Vol. 6, no. 12. — P. 4370–4379. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.6.4370.

Сведения об авторах:

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

E-mail: kostya_altunin@mail.ru
ORCID iD 0000-0002-0725-9416
Web of Science ResearcherID I-5739-2014
SCOPUS ID 57201126207
IstinaResearcherID 66185348

Original article
PACS 42.25.Bs
OCIS 160.3918
MSC 78A25

Investigation of the optical properties of a hyperbolic metamaterial for the optical spectral range

K. K. Altunin

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432000, Ulyanovsk, Russia

Submitted July 8, 2026
Resubmitted July 10, 2026
Published September 30, 2026

Abstract. The results of a theoretical and numerical study of the optical properties of a hyperbolic metamaterial for the optical spectral range are presented. Hyperbolic metamaterials constitute a class of anisotropic media in which one or two principal components of the permittivity tensor have a sign opposite to that of the remaining components. A model accounting for anisotropy, dissipation, and spatial dispersion was developed to derive analytical expressions for the permittivity tensor and dispersion relations. Additionally, a numerical model of optical processes in hyperbolic metamaterial films was created based on the Maxwell-Garnett approximation. Numerical calculations of effective medium parameters—such as the refractive index, surface impedance, and optical reflection, transmission, and absorption coefficients—were performed, confirming the validity of the analytical results. It is demonstrated that hyperbolic metamaterials exhibit strong local field enhancement.

Keywords: anisotropy, optical properties, plane electromagnetic wave, metamaterial, hyperbolic metamaterial, nanophotonics, reflection coefficient, transmission coefficient, effective medium approximation, local field enhancement

References

1. Davidovich M. V. Hyperbolic metamaterials: production, properties, applications, and prospects // Physics-Uspekhi. — 2019. — dec. — Vol. 62, no. 12. — P. 1173–1207. — URL: http://dx.doi.org/10.3367/ufne.2019.08.038643.

2. Hyperbolic metamaterials and metasurfaces: fundamentals and applications / Pengcheng Huo [et al.] // Advanced optical materials. — 2019. — apr. — Vol. 7, no. 14. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/adom.201801616.

3. Hyperbolic metamaterials and their applications / Lorenzo Ferrari [et al.] // Progress in Quantum Electronics. — 2015. — mar. — Vol. 40. — P. 1–40. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.pquantelec.2014.10.001.

4. Shekhar Prashant, Atkinson Jonathan, Jacob Zubin. Hyperbolic metamaterials: fundamentals and applications // Nano convergence. — 2014. — june. — Vol. 1, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1186/s40580-014-0014-6.

5. Anomalously weak scattering in metal-semiconductor multilayer hyperbolic metamaterials / Hao Shen [et al.] // Physical Review X. — 2015. — may. — Vol. 5, no. 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/physrevx.5.021021.

6. Loss-compensated and active hyperbolic metamaterials / Xingjie Ni [et al.] // Optics Express. — 2011. — nov. — Vol. 19, no. 25. — P. 25242. — URL: http://dx.doi.org/10.1364/oe.19.025242.

7. Engineering transient hyperbolic metamaterials using InAsSb-based semiconductor / H. J. Haugan [et al.] // AIP Advances. — 2021. — july. — Vol. 11, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0040294.

8. Yan Wei, Wubs Martijn, Mortensen N. Asger. Hyperbolic metamaterials: nonlocal response regularizes broadband supersingularity // Physical Review B. — 2012. — nov. — Vol. 86, no. 20. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.205429.

9. Subwavelength optics with hyperbolic metamaterials: waveguides, scattering, and optical topological transitions / Satoshi Ishii [et al.] // 2016 18th International conference on transparent optical networks (ICTON). — IEEE, 2016. — july. — P. 1–4. — URL: http://dx.doi.org/10.1109/icton.2016.7550461.

10. Ballantine K. E., Donegan J. F., Eastham P. R. Conical diffraction and the dispersion surface of hyperbolic metamaterials // Physical Review A. — 2014. — july. — Vol. 90, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.90.013803.

11. Broadband acoustic hyperbolic metamaterial / Chen Shen [et al.] // Physical Review Letters. — 2015. — dec. — Vol. 115, no. 25. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.254301.

12. Shekhar Prashant, Jacob Zubin. Strong coupling in hyperbolic metamaterials // Physical Review B. — 2014. — july. — Vol. 90, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.90.045313.

13. Hyperbolic metamaterials with Bragg polaritons / Evgeny S. Sedov [et al.] // Physical Review Letters. — 2015. — june. — Vol. 114, no. 23. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.237402.

14. Smolyaninov Igor I. Analog of gravitational force in hyperbolic metamaterials // Physical Review A. — 2013. — sept. — Vol. 88, no. 3. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.88.033843.

15. Self-induced torque in hyperbolic metamaterials / Pavel Ginzburg [et al.] // Physical Review Letters. — 2013. — july. — Vol. 111, no. 3. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.036804.

16. Casimir force between hyperbolic metamaterials / Ge Song [et al.] // Physical Review A. — 2017. — feb. — Vol. 95, no. 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.95.023814.

17. Optical pulling forces in hyperbolic metamaterials / Alexander S. Shalin [et al.] // Physical Review A. — 2015. — june. — Vol. 91, no. 6. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.91.063830.

18. Purcell effect in hyperbolic metamaterial resonators / Alexey P. Slobozhanyuk [et al.] // Physical Review B. — 2015. — Nov. — Vol. 92. — P. 195127. — URL: https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.92.195127.

19. Topological photonic phase in chiral hyperbolic metamaterials / Wenlong Gao [et al.] // Physical Review Letters. — 2015. — jan. — Vol. 114, no. 3. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.037402.

20. Biehs S. A., Tschikin M., Ben-Abdallah P. Hyperbolic metamaterials as an analog of a blackbody in the near field // Physical Review Letters. — 2012. — sept. — Vol. 109, no. 10. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.104301.

21. Radiative thermal diode via hyperbolic metamaterials / Qizhang Li [et al.] // Physical Review Applied. — 2021. — dec. — Vol. 16, no. 6. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.064022.

22. Microscopic model of Purcell enhancement in hyperbolic metamaterials / Alexander N. Poddubny [et al.] // Physical Review B. — 2012. — july. — Vol. 86, no. 3. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.035148.

23. Compton-like polariton scattering in hyperbolic metamaterials / Ivan V. Iorsh [et al.] // Physical Review Letters. — 2015. — may. — Vol. 114, no. 18. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.185501.

24. Papadakis Georgia T., Atwater Harry A. Field-effect induced tunability in hyperbolic metamaterials // Physical Review B. — 2015. — nov. — Vol. 92, no. 18. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.92.184101.

25. Hyperbolic metamaterials based on multilayer graphene structures / Ivan V. Iorsh [et al.] // Physical Review B. — 2013. — feb. — Vol. 87, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.87.075416.

26. High-frequency homogenization for layered hyperbolic metamaterials / A. A. Krokhin [et al.] // Physical Review B. — 2016. — feb. — Vol. 93, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.93.075418.

27. Mirmoosa M. S., Kosulnikov S. Yu., Simovski C. R. Magnetic hyperbolic metamaterial of high-index nanowires // Physical Review B. — 2016. — aug. — Vol. 94, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.94.075138.

28. Anomalous resonances of an optical microcavity with a hyperbolic metamaterial core / Evgenij Travkin [et al.] // Physical Review B. — 2018. — may. — Vol. 97, no. 19. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.97.195133.

29. Miniaturizing optical antennas using hyperbolic metamaterial wires / Rafik Smaali [et al.] // Physical Review B. — 2017. — apr. — Vol. 95, no. 15. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.95.155306.

30. Photonic Chern insulators made of gyromagnetic hyperbolic metamaterials / Ruei-Cheng Shiu [et al.] // Physical Review Materials. — 2020. — june. — Vol. 4, no. 6. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.4.065202.

31. Vaianella Fabio, Maes Bjorn. Fano resonance engineering in slanted cavities with hyperbolic metamaterials // Physical Review B. — 2016. — sept. — Vol. 94, no. 12. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.94.125442.

32. Poddubny Alexander N., Iorsh Ivan V., Sukhorukov Andrey A. Generation of photon-plasmon quantum states in nonlinear hyperbolic metamaterials // Physical Review Letters. — 2016. — sept. — Vol. 117, no. 12. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.123901.

33. Anomalously weak scattering in metal-semiconductor multilayer hyperbolic metamaterials / Hao Shen [et al.] // Physical Review X. — 2015. — may. — Vol. 5, no. 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/physrevx.5.021021.

34. Zhang Yang, Zheng Li-Yang, Christensen Johan. Defect-immune sound radiation in a topologically nontrivial hyperbolic metamaterial // Physical Review Letters. — 2025. — apr. — Vol. 134, no. 15. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.156602.

35. Second-harmonic double-resonance cones in dispersive hyperbolic metamaterials / Domenico de Ceglia [et al.] // Physical Review B. — 2014. — feb. — Vol. 89, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.075123.

36. Pustovit Vitaliy N., Urbas Augustine M., Zelmon David E. Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation in hyperbolic metamaterials // Physical Review B. — 2016. — dec. — Vol. 94, no. 23. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.94.235445.

37. Miller Owen D., Johnson Steven G., Rodriguez Alejandro W. Effectiveness of thin films in lieu of hyperbolic metamaterials in the near field // Physical Review Letters. — 2014. — apr. — Vol. 112, no. 15. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.157402.

38. Hyperbolic metamaterial nanoresonators make poor single-photon sources / Simon Axelrod [et al.] // Physical Review B. — 2017. — apr. — Vol. 95, no. 15. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.95.155424.

39. Dispersionless gaps and cavity modes in photonic crystals containing hyperbolic metamaterials / Chun-hua Xue [et al.] // Physical Review B. — 2016. — mar. — Vol. 93, no. 12. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.93.125310.

40. Magnetically tunable near-field radiative heat transfer in hyperbolic metamaterials / Jinlin Song [et al.] // Physical Review Applied. — 2020. — feb. — Vol. 13, no. 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.024054.

41. Giant photoresponsivity of midinfrared hyperbolic metamaterials in the photon-assisted-tunneling regime / Pai-Yen Chen [et al.] // Physical Review Applied. — 2016. — apr. — Vol. 5, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.5.041001.

42. Savoia Silvio, Castaldi Giuseppe, Galdi Vincenzo. Optical nonlocality in multilayered hyperbolic metamaterials based on Thue-Morse superlattices // Physical Review B. — 2013. — june. — Vol. 87, no. 23. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.87.235116.

43. Topological bands and triply degenerate points in non-Hermitian hyperbolic metamaterials / Junpeng Hou [et al.] // Physical Review Letters. — 2020. — feb. — Vol. 124, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.073603.

44. Sub-diffraction-limit imaging system with two interfacing hyperbolic metamaterials / Kirill Bronnikov [et al.] // Physical Review Applied. — 2021. — oct. — Vol. 16, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.044054.

45. Kidwai Omar, Zhukovsky Sergei V., Sipe J. E. Effective-medium approach to planar multilayer hyperbolic metamaterials: strengths and limitations // Physical Review A. — 2012. — may. — Vol. 85, no. 5. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.85.053842.

46. Guclu Caner, Campione Salvatore, Capolino Filippo. Hyperbolic metamaterial as super absorber for scattered fields generated at its surface // Physical Review B. — 2012. — nov. — Vol. 86, no. 20. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.205130.

47. Redshift gaps in one-dimensional photonic crystals containing hyperbolic metamaterials / Feng Wu [et al.] // Physical Review Applied. — 2018. — dec. — Vol. 10, no. 6. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.064022.

48. Розенберг Г. В. Оптика тонкослойных покрытий. — Москва : Физматгиз, 1958. — 572 с.

49. M. Born, E. Wolf. Principles of optics. — Oxford : Pergamon Press, 1969. — 720 p.

50. Johnson P. B., Christy R. W. Optical constants of the Noble metals // Physical Review B. — 1972. — Dec. — Vol. 6, no. 12. — P. 4370–4379. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.6.4370.

51. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity / D. R. Smith [et al.] // Physical Review Letters. — 2000. — May. — Vol. 84, no. 18. — P. 4184–4187. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4184.

52. Hyperbolic metamaterials / Alexander Poddubny [et al.] // Nature photonics. — 2013. — Nov. — Vol. 7, no. 12. — P. 948–957. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2013.243.

53. Jacob Zubin, Smolyaninov Igor I., Narimanov Evgenii E. Broadband Purcell effect: radiative decay engineering with metamaterials // Applied Physics Letters. — 2012. — Apr. — Vol. 100, no. 18. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.4710548.

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

Секция 2

Науки об образовании

2.1 Теория и методика обучения и воспитания

Научная статья
УДК 372.853
ББК 74.48
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.Di
OCIS 000.20600
MSC 00A79

Разработка курса по компьютерному моделированию квантовых систем пониженной размерности в системе управления обучением MOODLE

Е. А. Илюшкина [1]

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432000, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 15 июля 2026 года
После переработки 17 июля 2026 года
Опубликована 30 сентября 2026 года

Аннотация. Представлены результаты разработка дистанционного курса по компьютерному моделированию квантовых систем пониженной размерности в системе управления обучением MOODLE. Описаны результаты разработки тематической структуры и учебных материалов дистанционного курса по компьютерному моделированию квантовых систем пониженной размерности в системе управления обучением MOODLE.

Ключевые слова: курс, дистанционный курс, компьютерное моделирование, система пониженной размерности

[1]E-mail: elenailuskina2004@gmail.com

Введение

Разработка курса по компьютерному моделированию квантовых систем пониженной размерности в интегрированной системе управления обучением MOODLE становится особенно актуальной в условиях цифровизации высшего образования и формирования междисциплинарной компетенции, необходимой для решения задач нанотехнологий и квантовых технологий, где моделирование становится ключевым навыком для подготовки специалистов в области нанотехнологий, оптоэлектроники и квантовых технологий, требующих глубокого понимания как теоретических основ, так и практических инструментов программной реализации. Использование системы управления обучением MOODLE в качестве платформы для дистанционного курса позволяет преодолеть географические и временные барьеры, обеспечивая студентам и исследователям из разных регионов возможность изучать сложные методы моделирования и квантово-химические пакеты в удобном темпе, что особенно важно для формирования компетенций в условиях дефицита специализированных очных лабораторий. Курс отвечает потребностям в гибком и доступном обучении специалистов, способных применять методы численного моделирования для анализа и проектирования структур с заданными электрооптическими, магнитными и транспортными свойствами, сокращая тем самым зависимости от дорогостоящих лабораторных стендов и очного взаимодействия. Особое внимание уделяется многофизическому моделированию, объединяющему электростатику, теплопроводность, спин-динамику и нелинейные оптические эффекты, что критично для проектирования лазеров, солнечных элементов, спинтронных устройств и квантовых компьютеров. Методы включают как аналитические решения (матричный метод передачи электромагнитных волн для оптики, теория возмущений для электрооптических эффектов) так и численные алгоритмы (метод конечных элементов, методы Монте-Карло, метод неравновесной матрицы плотности), позволяющие учитывать дефекты, дислокации и взаимодействие с фононами или фотонами. Эта область активно развивается на стыке физики, материаловедения и информационных технологий, обеспечивая виртуальное прототипирование наноустройств до их физической реализации и ускоряя открытия в таких приоритетных направлениях, как квантовые технологии, гибкая электроника и нейроморфные системы. Актуальность темы также связана с ростом интереса к квантовым материалам (графен, перовскиты, наноструктурированные полупроводники) и необходимостью подготовки кадров, владеющих как теоретическими основами, так и практическими навыками работы с программными комплексами (Lumerical, COMSOL) и Python-библиотеками, что напрямую влияет на инновационное развитие отрасли. Актуальность курса обусловлена необходимостью сочетания теоретического обучения (например, анализ формул для поляритонов, электрооптических эффектов) с практическим освоением специализированных программных пакетов (Lumerical, COMSOL) и Python-библиотек, что позволяет студентам не только воспроизводить научные результаты, но и разрабатывать собственные модели для решения прикладных задач в области оптоэлектроники и квантовой инженерии.

Компьютерное моделирование квантово-размерных систем представляет собой междисциплинарное направление, сочетающее квантовую механику, вычислительную физику и материаловедение для изучения наноструктур, размеры которых сравнимы с длиной волны де Бройля для электронов. Основными объектами исследования выступают квантовые точки, нанопроволоки, двумерные материалы (графен, дихалькогениды переходных металлов) и гетероструктуры, в которых проявляются уникальные эффекты: размерное квантование, кулоновская блокада, спин-орбитальное взаимодействие и экситон-биэкситонная динамика. Методы моделирования варьируются от подходов на основе функционала матрицы плотности до полуэмпирических (модель эффективной массы, $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$-теория) и классических уравнений (уравнения Максвелла для

оптики, транспортные модели). Актуальность направления определяется его вкладом в разработку оптоэлектроники, квантовых вычислений, спинтроники и фотоники, где моделирование позволяет предсказывать свойства материалов до их синтеза, оптимизировать параметры устройств и сокращать затраты на экспериментальные исследования. Современные вычислительные платформы интегрируют параллельные алгоритмы, машинное обучение для ускоренного скрининга материалов и гибридные модели, сочетая атомистические и феноменологические подходы для решения масштабируемых задач в наноэлектронике.

Рассматриваются результаты разработки дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем в виде дистанционного курса, созданного в системе управления обучением MOODLE. Дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем посвящён изучению методов компьютерного моделирования квантово-размерных систем. Проведено описание основных функциональных возможностей дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета. Обсуждаются возможности модульной структуры дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем.

Курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем посвящён изучению фундаментальных идей физики квантово-размерных систем. В работе рассматриваются методические особенности процесса разработки дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем в системе управления обучением MOODLE, который может быть использован в вузовском курсе физики.

Целью работы является описание процесса разработки дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем. Задача исследования состоит в разработке модульной структуры и заданий дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем в системе управления обучением MOODLE. Объектом исследования является курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем. Предметом исследования является процесс создания информационных и контролирующих элементов дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем в системе управления обучением MOODLE.

Гипотеза научного исследования состоит в том, что если использовать курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, основанный на комбинации теоретических методов и численных методов в процессе изучения квантовой физики квантово-размерных систем, то можно повысить познавательный интерес студентов к физике квантово-размерных систем.

Обзор работ по моделированию квантово-размерных систем

Область моделирования квантово-размерных систем охватывает численные методы исследования наноструктур — таких как квантовые точки, ямы, проволоки и слоистые гетероструктуры, в которых квантовые эффекты (например, размерное квантование, туннелирование, взаимодействия экситонов и поляритонов) определяют их уникальные оптоэлектронные, магнитные и транспортные свойства. В основе моделирования лежат квантовые уравнения (уравнение Шрёдингера, метод функционала плотности, $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$-теория) и классические подходы (уравнения Максвелла для оптических свойств, уравнения Больцмана для переноса заряда), интегрируемые с помощью специализированных программных пакетов.

Квантово-размерные системы пониженной размерности, включая квантовые ямы с двухмерном ограничением пространства, квантовые проволоки с одномерном огра-

ничением пространства и квантовые точки с нуль-мерном ограничением пространства, демонстрируют дискретные энергетические спектры из-за квантового ограничения. Моделирование этих систем требует сопоставления атомистических деталей с макроскопической физикой устройств. Разработана иерархия теоретических подходов, каждый из которых имеет компромисс между точностью, вычислительными затратами и физической прозрачностью.

Самым простым и наиболее исторически влиятельным подходом является приближение эффективной массы. Приближение эффективной массы рассматривает электроны и дырки как свободные частицы с эффективной массой $m^{\pm}$, ограниченные потенциальной ямой. В своей самой простой форме уравнение Шрёдингера для одной зоны решается внутри и вне наноструктуры. Хотя оно быстрое и интуитивно понятное, приближение эффективной массы имеет известные ограничения, то есть оно справедливо только вблизи краёв зон и для малых энергий ограничения. Приближение эффективной массы переоценивает энергии ограничения в малых квантовых точках, поскольку реальные зоны отклоняются от параболичности при больших k-векторах [1]. Модификация квадратной ямы конечной глубины значительно улучшает предсказания приближение эффективной среды, обеспечивая хорошее соответствие экспериментальным данным для квантовых точек и квантовых проволок II–VI и III–V в широком диапазоне размеров, при условии, что зоны почти параболические [2]. Для полупроводников с узкой запрещённой зоной (например, PbS, PbSe, InAs) приближение эффективной среды с конечной ямой не работает из-за сильной непараболичности, и становятся необходимыми многозонные или гиперболические зонные модели [2].

В статье [3] показано, что $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$-метод обобщает приближения эффективной среды путём связи нескольких зон в рамках огибающей функции. Наиболее широко используемыми вариантами являются модели 6×6 (валентные полосы, включая полосы тяжелых дырок, лёгких дырок и расщеплённые полосы) и 8×8 (добавление полосы проводимости). Знаковое сравнение, проведённое Фу, Вангом и Зунгером [3], показало, что стандартный подход 6×6 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ значительно переоценивает энергии локализации как электронов, так и дырок в квантовых точках InP по сравнению с прямой псевдопотенциальной диагонализацией. Кроме того, для материалов с малым спин-орбитальным взаимодействием $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ предсказывает неверный порядок валентных состояний (p-подобные выше s-подобных) [3]. Ошибки были связаны с неточным описанием дисперсии объёмных зон в приближении $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ вдали от точки Г, особенно для полос лёгких дырок и проводимости.

Систематический вывод уравнений эффективной массы для 8-зонной $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ в зоне проводимости, выполненный Миелником-Пыщорским и др. [4], показал, что количественно точное уравнение эффективной массы для самоорганизующихся квантовых точек требует: самосогласованной перенормировки параметров $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$, включения поправок на непараболичность посредством средних членов $< k^2 >$ и охранения полной матричной структуры валентной зоны. Даже в этом случае ошибка расщепления $s - p$-оболочки может составлять $\approx 30\,\%$ для однородных квантовых точек InAs/GaAs, хотя согласие улучшается для гладких профилей состава [4]. Интересно, что электронный g-фактор можно достаточно хорошо оценить, используя простую полуфеноменологическую формулу Рота-Лакса-Цвердлинга [4].

Для деформированных квантовых точек InAs/GaAs эффективный подход с одной подзоной, зависящей от энергии эффективной массой и дополнительным отталкивающим потенциалом, имитирующим деформацию и пьезоэлектрические эффекты, успешно воспроизводит как расчёты, так и экспериментальные данные зависимости ёмкости от напряжения [5].

Метод сильной связи предлагает атомистическое описание квантовых систем путём построения волновых функций как линейных комбинаций атомоподобных орбиталей.

Модель эффективных связывающих орбиталей [6] заменяет структуру цинковой обманки эффективной гранецентрированной кубической решёткой, используя лишь несколько орбиталей на узел. Ключевые результаты исследований метода сильной связи включают: для квантовых точек GaAs приближения эффективной среды качественно воспроизводит структуру уровней (группировка уровней, пространственная зависимость волновых функций), но количественно переоценивает энергии ограничения для диаметров менее ≈ 40 Åиз-за непараболичности [6]. Для точек CdS параметризация метода сильной связи, подгоняющая объёмную зонную структуру по всей зоне Бриллюэна, даёт хорошее соответствие экспериментальным данным оптического поглощения после включения кулоновских поправок [6]. Волновые функции метода сильной связи точно соответствуют огибающим функциям приближения эффективной среды по форме, но конечная амплитуда на границе кристаллитов подразумевает необходимость конечных (а не бесконечных) потенциалов ограничения (≈ 10 эВ) [6].

Метод эмпирических псевдопотенциалов решает уравнение Шрёдингера для одной частицы напрямую, используя экранированные нелокальные псевдопотенциалы для каждого типа атомов без обращения к эффективным массам. Для квантовых точек из $\approx 10^3$ атомов метод свёрнутого спектра позволяет получить точные собственные решения вблизи краёв зон с помощью линейных вычислений с учётом масштабирования [3]. Метод эмпирических псевдопотенциалов был применён к квантовым точкам Si, CdSe, GaAs и InP, что позволило получить ширины запрещённых зон в отличном согласии с экспериментом. Его ключевое преимущество заключается в том, что не требуются приближения эффективной массы или параметры подгонки, выходящие за рамки объёмных псевдопотенциалов [3].

Усовершенствованный нормализованный метод плоских волн с использованием рядов Фурье-синусов (вместо периодических граничных условий) значительно снижает вычислительные затраты для расчетов $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ квантовых точек [7]. Для квантовых точек Si была разработана методика коррекции размера для согласования $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ с результатами сильной связи: для точек диаметром менее ≈ 2 нм диаметр $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ должен быть увеличен более чем на 30 % для соответствия основному состоянию дырки сильной связи, учитывая делокализацию волновой функции на пассивирующие атомы водорода [7].

Для квазиодномерных наноструктур (квантовых проводов и сильно вытянутых квантовых точек) была выведена аналитическая формула в реальном пространстве для эффективного потенциала электрон-электронного взаимодействия путём усреднения трёхмерного кулоновского потенциала по поперечным степеням свободы [8]. Этот потенциал мягче, чем чистый кулоновский потенциал на малых расстояниях, имеет пик при нулевом расстоянии и не содержит параметров подгонки. Он точно воспроизводит полные трёхмерные результаты для образования молекул Вигнера в связанных квантовых точках и энергии связывания экситонов в квантовых проволоках [8].

Когда квантовая точка внедрена в матрицу с диэлектрическим несоответствием, заряды поверхностной поляризации изменяют как потенциал одной частицы (самополяризация), так и электрон-электронное взаимодействие. Вычислительно осуществимая модель в рамках приближения локальной спиновой плотности обрабатывает индуцированные заряды [9]. Для вытянутых наностержней CdSe в изолирующей среде диэлектрическое ограничение смещает плотность электронов к концам стержня, не изменяя лежащую в основе корреляционную фазу (волна плотности заряда против волны плотности спина), за исключением фазовых переходов, где оно может инвертировать порядок стабильности [9].

Гибридный гамильтониан размерностей, интерполирующий между одномерным и двумерным движением, моделирует квантовый провод на поверхности, где частицы имеют разные эффективные массы для движения вдоль провода и вдоль поверхности

[10]. Запаздывающая функция Грина приобретает дополнительные экспоненциальные члены из-за провода, и влияние провода на рассеяние на примесях экспоненциально подавляется, если примесь или точка наблюдения находятся далеко от провода. Эффект наиболее выражен, когда эффективная масса вдоль провода намного меньше, чем на поверхности (например, нанопровод InSb на Si) [10].

Новые квантовые теории встраивания, включая квантовую теорию встраивания функционала плотности, теорию встраивания матрицы плотности и методы, основанные на функциях Грина, разделяют систему на активную область, обрабатываемую с высокой точностью, и среду, обрабатываемую с меньшими затратами [11]. Эти подходы перспективны для моделирования сильно коррелированных спиновых дефектов (например, NV^- в алмазе, дивакансия в SiC) на зашумлённых квантовых компьютерах промежуточного масштаба. Расчёты на квантовом оборудовании (сверхпроводящие кубиты IBM, ионные ловушки) с использованием 2 или 4 кубитов продемонстрировали осуществимость, хотя аппаратный шум остаётся проблемой [11].

Относительно простая схема вычисляет собственные значения ограниченных блоховских волн в низкоразмерных системах, используя преобразование Фурье ограниченных стоячих волн в качестве коэффициентов разложения для блоховских состояний [1, 12]. Этот подход, который интегрирует по дисперсионному соотношению объёма, а не диагонализирует большие гамильтонианные матрицы, улучшает приближение эффективной среды, используя полную объёмную зонную структуру, а не только её кривизну. Этот подход был успешно применён к кубическим квантовым точкам GaAs, предсказывая переход от $\Gamma_{1,c}$ к $X_{1,c}$ при критическом размере ≈ 41 Å [1].

Результаты разработки структуры дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем

Курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем и структур пониженной размерности предназначен для студентов, интересующихся передовыми направлениями квантовой физики систем пониженной размерности. Курс сочетает теоретическое обоснование физических концепций, практическое применение численных методов и мультифизических моделей, а также анализ актуальных технологических решений в области физики и технологии квантовых систем пониженной размерности. Общая трудоёмкость курса составляет 180 академических часов, что соответствует 5 зачётным единицам и распределяется равномерно по модулям для обеспечения глубокого и систематического усвоения теоретического материала.

Процесс разработки дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем в системе управления обучением MOODLE начинается с анализа образовательных потребностей и требований к компетенциям выпускников, определяя акцент на практическую применимость знаний в сфере нанотехнологий и квантовых вычислений. На следующем этапе проводится структурирование учебного материала с учётом логики построения курса, где теоретические основы квантовой механики и численного моделирования (темы 2 и 3) предваряют изучение конкретных наноструктур (темы 5-13), обеспечивая постепенное усложнение задач от квантовых ям до молекулярных систем. Особое внимание уделяется интеграции практических занятий, где студенты освоят языки программирования Python и Octave как основные инструменты для реализации численных методов, таких как методы конечных разностей, квантово-химические расчёты (метод матрицы плотности в библиотеке PySCF) и моделирование транспортных свойств квантово-размерных систем с использованием пакетов QuTiP или MEEP. Подготовка мультимедийных материалов, включая анимации процессов квантования, интерактивные симуляции в Jupyter Notebook и лекции с демонстрацией кода, позволяет обеспечить доступность сложного материала для дистанционного

обучения, а модульная система контроля с промежуточными тестами и проектными задачами формирует мотивацию и фиксирует прогресс. Организация групповых проектов по моделированию конкретных наноструктур (например, квантовых точек или графеновых гетероструктур) с последующей защитой в виде репозиториев на GitHub или презентаций в системе управления обучением MOODLE активизирует практическое применение знаний, а экспертная оценка работ способствует формированию критического мышления. На этапе настройки системы управления обучением MOODLE разрабатываются автоматизированные системы обратной связи, включая проверку кода на корректность и соответствие заданию, а также форумы для обсуждения теоретических и технических вопросов, что создаёт сообщество учащихся и поддерживает академическую дискуссию. Для обеспечения гибкости курса внедряется адаптивная система оценки, учитывающая как теоретические знания, так и умение решать прикладные задачи, с возможностью доработки проектов на основе обратной связи от преподавателей. Техническая поддержка и обучение студентов работе с платформой через краткие руководства по системе управления обучением MOODLE и инструментам версиирования кода минимизирует барьеры при переходе на дистанционную форму обучения. На заключительном этапе проводится оптимизация содержания курса на основе анализа статистики успешности выполнения заданий и отзывов студентов, что позволяет корректировать сложность материалов, уделять больше времени проблемным темам и вводить новые актуальные примеры, например, связанные с фотонными материалами или наноструктурами для квантовых компьютеров. Внедрение системы взаимной оценки проектов стимулирует командную работу, а интеграция с внешними ресурсами, такими как базы данных материалов или вычислительные кластеры, расширяет возможности для глубокого погружения в прикладные аспекты моделирования. Завершающим шагом становится сертификация курса и разработка методических рекомендаций, которые позволят другим высшим учебным заведениям адаптировать его для своих нужд, обеспечивая масштабируемость и воспроизводимость образовательного продукта в области квантового моделирования.

Первая тема дистанционного курса посвящена изучению особенностей низкоразмерных систем и элементарных наноструктур из системы квантовых ям, нитей, точек и полупроводниковых. Вторая тема дистанционного курса посвящена изучению методов квантовой механики для моделирования квантово-размерных систем. Третья тема дистанционного курса посвящена изучению численных методов в моделировании квантово-размерных систем. Четвёртая тема дистанционного курса посвящена изучению программного обеспечения и инструментов для моделирования систем пониженной размерности. Пятая тема посвящена изучению моделирования низкоразмерных систем из наночастиц и кластеров. Шестая тема посвящена изучению моделирования квантовых точек и проволок. Седьмая тема дистанционного курса посвящена изучению электронных и транспортных свойств квантово-размерных систем. Восьмая тема дистанционного курса посвящена изучению двумерного электронного газа в структурах металл–диэлектрик–полупроводник. Девятая тема посвящена изучению квантового эффекта Холла в двумерном электронном газе. Десятая тема посвящена изучению транспортных явлений в наноструктурах из квантово-размерных систем. Одиннадцатая тема посвящена изучению туннелирования через квантово-размерные структуры. Двенадцатая тема дистанционного курса посвящена изучению моделирования оптических и магнитных свойств наноструктур на основе квантово-размерных систем. Тринадцатая тема посвящена изучению моделирования структур одноэлектроники. Четырнадцатая тема посвящена изучению статистической физики и термодинамики квантово-размерных систем. Пятнадцатая тема дистанционного курса посвящена изучению моделирования молекулярных систем.

На первом этапе необходимо провести анализ образовательных потребностей и целевой аудитории, чтобы определить уровень подготовки студентов и их профессиональные ориентиры. Это позволит скорректировать глубину изложения материала и включить в курс актуальные задачи, востребованные в современной наноинженерии и фотонике. Особое внимание следует уделить изучению специфики дистанционного обучения, так как студенты, возможно, будут иметь разные уровни технической подготовки, включая владение программным обеспечением и численными методами.

Далее требуется определение образовательных целей и компетенций курса, которые должен освоить обучающийся по завершении курса. В данном случае ключевыми станут умение моделировать квантово-размерные системы с использованием современных программных инструментов, анализировать результаты численного моделирования, а также применить полученные знания для решения практических задач в области наноэлектроники и фотоники. Этот этап предполагает формулировку конкретных компетенций, таких как работа с квантово-механическими уравнениями, интерпретация спектров электронных состояний и оптимизация параметров наноструктур.

Следующим шагом становится структурирование тематического плана с учётом логики учебного процесса, где каждая тема должна органично переходить к следующей. Например, после изучения основ квантовой механики (тема 2) необходимо ввести численные методы (тема 3), чтобы студенты могли практически применять теоретические знания. Важно соблюдать баланс между теоретическими и практическими разделами, чтобы избежать перегрузки студента и обеспечить постепенное усложнение материала. При этом темы, связанные с программным обеспечением (тема 4), должны предварять практику моделирования (темы 5–15), чтобы студенты могли сразу приступить к работе с инструментами.

Одним из ключевых этапов является разработка методического обеспечения курса, включающего учебные материалы, интерактивные симуляции и задания для самостоятельной работы. В контексте дистанционного формата особое значение приобретают мультимедийные ресурсы: видеолекции с объяснением сложных концепций, интерактивные модули для визуализации электронных состояний в наноструктурах, а также шаблоны кода для моделирования на различных платформах (например, COMSOL, Python, Octave). Также необходимо предусмотреть подробные руководства по установке и настройке программного обеспечения, чтобы минимизировать технические трудности студентов.

На следующем этапе требуется проектирование системы оценки знаний и навыков, которая будет объективно отражать уровень подготовки студентов. В данном курсе целесообразно сочетать традиционные формы контроля (тесты на теорию, домашние задания по численным расчётам) с более сложными формами проверки, такими как анализ результатов моделирования и защита проектов по оптимизации наноструктур. Автоматизированная проверка кода через специальные платформы (например, Moodle Assignment с загрузкой файлов) позволит экономить время преподавателя и повысить объективность оценок. Параллельно должна быть организована экспертная оценка проектных работ, где студенты разрабатывают модели реальных наносистем. Важным моментом является организация интерактивного взаимодействия, так как в дистанционном формате мотивация и вовлечённость студентов могут снижаться. Для этого необходимо создать форумы для обсуждения теоретических вопросов, вебинары по разбору практических задач и групповую работу над проектами. Например, студенты могут разрабатывать модели квантовых точек (тема 6) в командах, обмениваясь промежуточными результатами и получая обратную связь от преподавателя. Также полезно внедрить систему взаимной оценки, чтобы стимулировать активное участие в обсуждениях и улучшению качества работ.

Далее следует разработка разнообразных практических и проектных заданий по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, которые обеспечат прикладную направленность обучения. Задания должны быть разнообразными и постепенно усложняться: от простых расчётов электронных спектров (темы 1–3) до комплексных проектов по моделированию транспортных свойств наноструктур (темы 10–11) или оптимизации параметров одноэлектронных устройств (тема 13). Например, студенты могут смоделировать квантовый эффект Холла (тема 9) и сравнить результаты с экспериментальными данными, что поможет закрепить понимание теории и практических навыков. Проектные работы должны быть ориентированы на решение реальных задач, например, разработку модели нанофотонного детектора на основе квантовых точек.

Обязательным этапом является техническое сопровождение курса в системе управления обучением MOODLE, включающее настройку платформы для поддержки интерактивных элементов. На платформе должны быть созданы разделы для каждой темы с размещёнными материалами, форумами, ссылками на внешние ресурсы (например, научные статьи или лекции) и системами автоматизированной проверки. Также необходимо предусмотреть интеграцию с внешними инструментами, такими как Jupyter Notebook для выполнения численных расчётов или GitHub для хранения проектов студентов. Важным аспектом является обеспечение доступа к вычислительным ресурсам, так как моделирование наноструктур требует значительных вычислительных мощностей.

На очередном этапе необходимо пилотное тестирование курса с последующим анализом обратной связи. Это позволит выявить слабые места в методическом обеспечении, трудности, с которыми столкнулись студенты, и корректировать курс перед полноценным запуском. Особое внимание следует уделить трудностям, связанным с освоением программного обеспечения или пониманием физических концепций. Обратная связь от студентов поможет оптимизировать структуру курса, уточнить формулировки заданий и скорректировать объём материала для лучшего усвоения.

Заключительным, но не менее важным, этапом является доработка и финальная адаптация курса под конкретные условия реализации. На основе результатов пилотирования могут быть внесены изменения в тематическое планирование, улучшена наглядность презентаций, добавлены дополнительные материалы для слабо подготовленных студентов или углублённые задания для сильных обучающихся. Также необходимо провести обучение преподавателей и технических специалистов, которые будут сопровождать курс, чтобы они могли оперативно решать возникающие вопросы. Важно, чтобы курс оставался гибким и мог обновляться в соответствии с новыми научными данными и инструментами моделирования, что особенно актуально для быстро развивающихся областей, таких как нанотехнологии. Таким образом, последовательное прохождение всех этапов позволяет создать структурированный, доступный и практически ориентированный дистанционный курс, соответствующий современным требованиям к подготовке специалистов в области фотоники.

Результаты разработки материалов дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем

Первая лекция посвящена изучению особенностей низкоразмерных систем и элементарных наноструктур из системы квантовых ям, нитей, точек и полупроводниковых. Вторая лекция посвящена изучению методов квантовой механики для моделирования квантово-размерных систем. Третья лекция посвящена изучению численных методов в моделировании квантово-размерных систем. Четвёртая лекция посвящена изучению программного обеспечения и инструментов для моделирования квантово-размерных систем. Пятая лекция посвящена изучению моделирования низкоразмерных систем из на-

ночастиц и кластеров. Шестая лекция посвящена изучению моделирования квантовых точек и проволок. Седьмая лекция посвящена изучению электронных и транспортных свойств квантово-размерных систем. Восьмая лекция посвящена изучению двумерного электронного газа в МДП-структурах. Девятая лекция посвящена изучению квантового эффекта Холла в двумерном электронном газе. Десятая лекция посвящена изучению транспортных явлений в наноструктурах из квантово-размерных систем. Одиннадцатая лекция посвящена изучению туннелирования через квантово-размерные структуры. Двенадцатая лекция посвящена изучению моделирования оптических и магнитных свойств наноструктур на основе квантово-размерных систем. Тринадцатая лекция посвящена изучению моделирования структур одноэлектроники. Четырнадцатая лекция посвящена изучению статистической физики и термодинамики квантово-размерных систем. Пятнадцатая лекция посвящена изучению моделирования молекулярных систем.

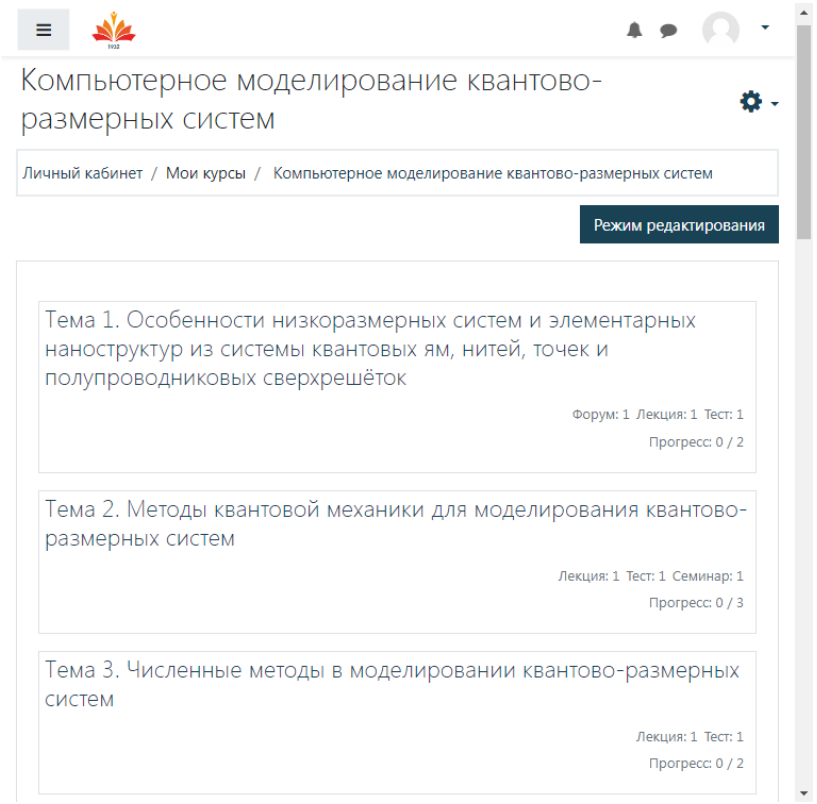


Рис. 1. Страница тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 1 приведено изображение страницы тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 приведено изображение страницы тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

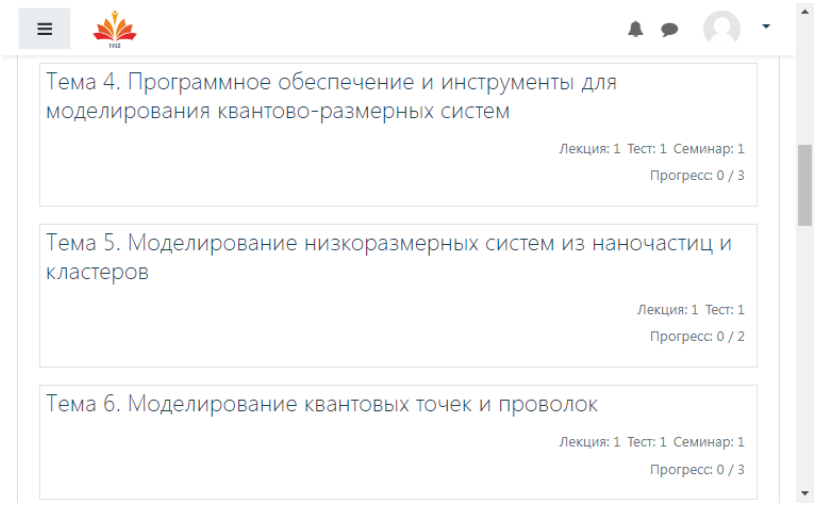


Рис. 2. Страница тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

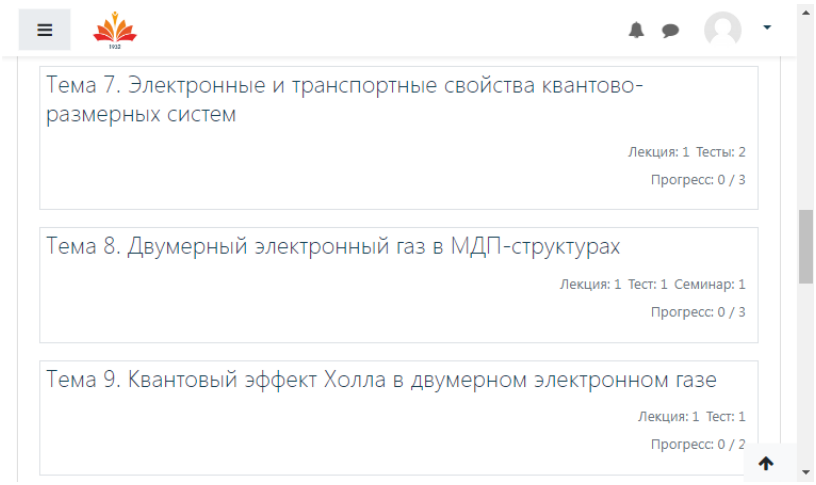


Рис. 3. Страница тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение страницы тематических модулей четвёртой зачётной единицы курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 5 приведено изображение страницы тематических модулей пятой зачётной единицы курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 6 приведено изображение страницы элементов первой темы курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 7 приведено изображение страницы элементов второй темы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 8 приведено изображение страницы элементов третьей темы дистанционного

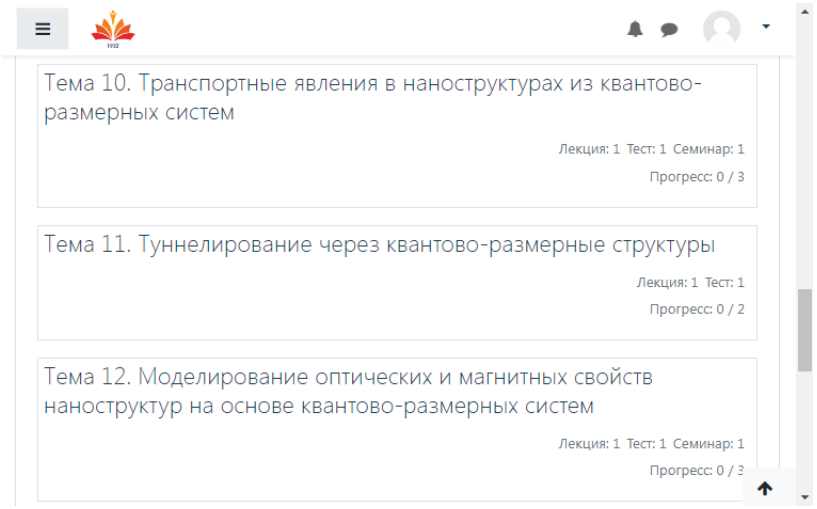


Рис. 4. Страница тематических модулей четвёртой зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

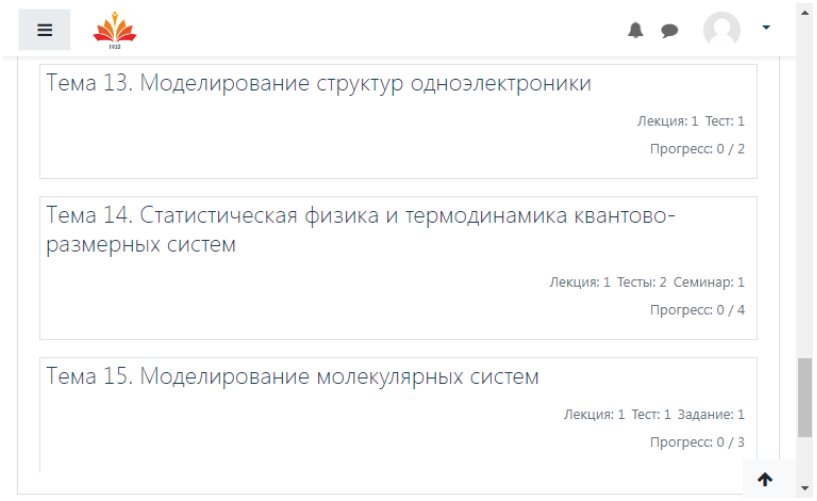


Рис. 5. Страница тематических модулей пятой зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

Первое занятие проводится в форме теста по особенностям низкоразмерных систем и элементарных наноструктур из системы квантовых ям, нитей, точек и полупроводниковых сверхрешёток. Второе занятие проводится в форме теста по методам квантовой механики для моделирования квантово-размерных систем. Третье занятие проводится в форме семинара по методам квантовой механики для моделирования квантово-размерных систем. Четвёртое занятие проводится в форме теста по численным методам в моделировании квантово-размерных систем. Пятое занятие проводится в форме теста по программному обеспечению и инструментам для моделирования квантово-размерных систем. Шестое занятие проводится в форме семинара по программному обеспечению и инструментам для моделирования квантово-размерных систем. Седьмое занятие проводится в форме теста по моделированию низкоразмерных систем из наночастиц и кластеров. Восьмое занятие проводится в форме теста по моделированию квантовых точек и проволок. Девятое занятие проводится в форме семинара по

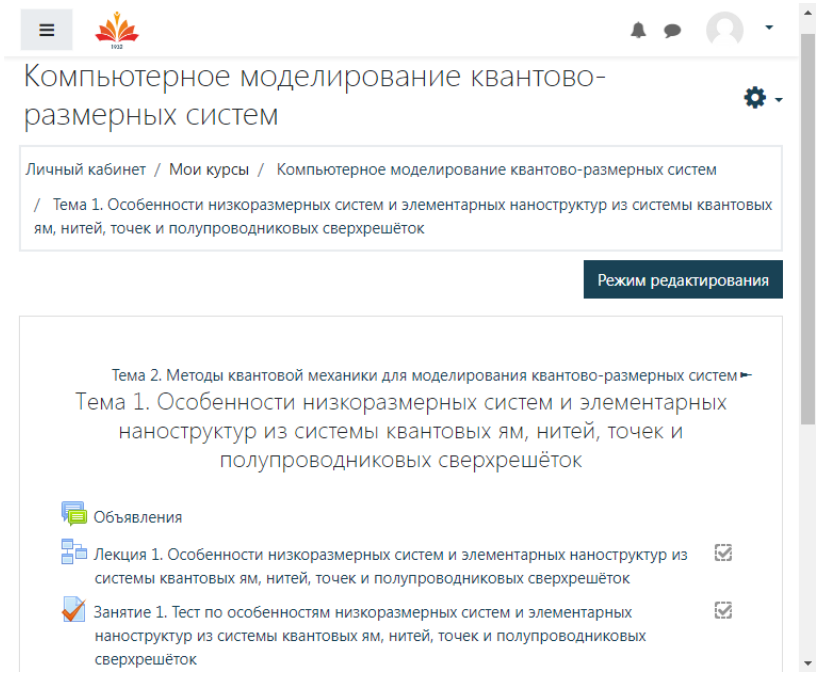


Рис. 6. Страница элементов первой темы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

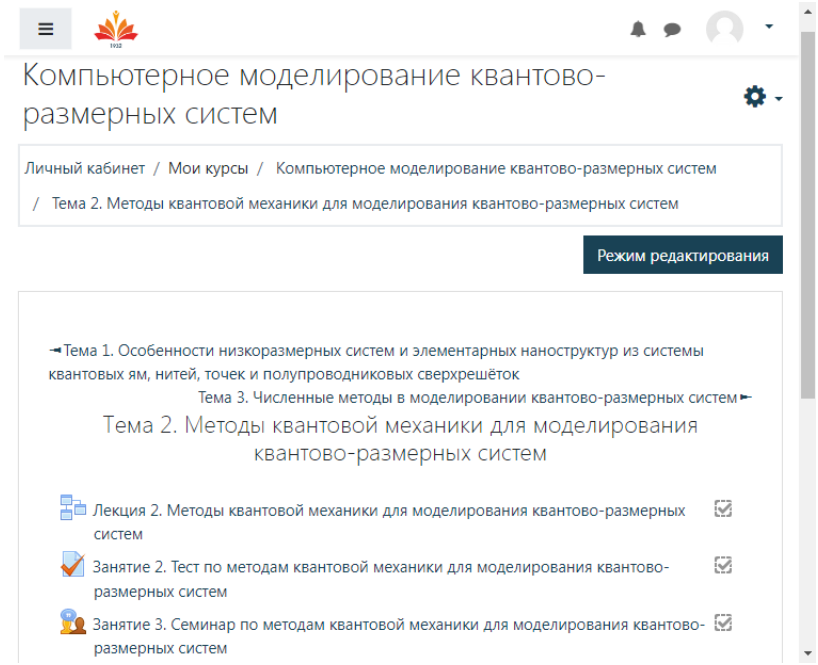


Рис. 7. Страница элементов второй темы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

моделированию квантовых точек и проволок. Десятое занятие проводится в форме теста по электронным и транспортным свойствам квантово-размерных систем. Одиннадцатое занятие проводится в форме первой контрольной работы. Двенадцатое занятие проводится в форме теста по двумерному электронному газу в МДП-структурах. Тринадцатое занятие проводится в форме семинара по двумерному электронному газу в МДП-структурах. Четырнадцатое занятие проводится в форме теста по квантово-

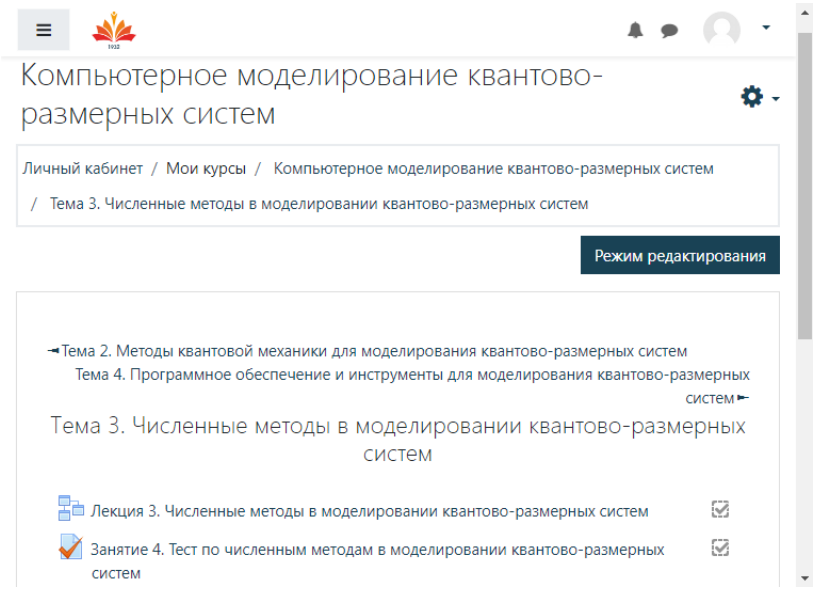


Рис. 8. Страница элементов третьей темы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

му эффекту Холла в двумерном электронном газе. Пятнадцатое занятие проводится в форме теста по транспортным явлениям в наноструктурах из квантово-размерных систем. Шестнадцатое занятие проводится в форме семинара по транспортным явлениям в наноструктурах из квантово-размерных систем. Семнадцатое занятие проводится в форме теста по туннелированию через квантово-размерные структуры. Восемнадцатое занятие проводится в форме теста по моделированию оптических и магнитных свойств наноструктур пониженной размерности на основе квантово-размерных систем. Девятнадцатое занятие проводится в форме семинара по моделированию оптических и магнитных свойств наноструктур на основе квантово-размерных систем. Двадцатое занятие проводится в форме теста по моделированию структур одноэлектроники. Двадцать первое занятие проводится в форме теста по статистической физике и термодинамике квантово-размерных систем. Двадцать второе занятие проводится в форме семинара по статистической физике и термодинамике квантово-размерных систем. Двадцать третье занятие проводится в форме второй контрольной работы. Двадцать четвёртое занятие проводится в форме теста по моделированию молекулярных систем. Двадцать пятое занятие проводится в форме итоговой работы по компьютерному моделированию квантово-размерных систем.

Процесс разработки курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем продемонстрировал, что успешное педагогическое проектирование дистанционного образования в области высокотехнологичных направлений, таких как моделирование квантово-размерных систем, требует комплексного подхода, сочетающего глубину теоретической подготовки с практической применимостью знаний. Важнейшим результатом стало формирование структурированного тематического плана, который обеспечивает логическую последовательность изучения материала от базовых физических принципов до сложных численных методов и программных инструментов, что позволяет студентам постепенно наращивать компетенции в области нанотехнологий и квантовой инженерии.

Одним из ключевых достижений курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем является интеграция теории и практики через использование современных программных пакетов и численных методов, что обеспечивает не только

усвоение фундаментальных знаний, но и развитие навыков приложения этих знаний в реальных задачах моделирования. Такой подход позволяет студентам не только анализировать электронные и транспортные свойства наноструктур, но и разрабатывать собственные модели, включая оптимизацию параметров квантовых точек и сверхрешёток, что соответствует современным требованиям к подготовке специалистов в сфере наноинженерии.

Особое значение в проектировании курса имело решение задачи мотивации и вовлечённости студентов в дистанционной образовательной среде. Введение интерактивных элементов, таких как форумы для обсуждения теоретических концепций, групповые проекты по моделированию конкретных наноструктур и системы взаимной оценки работ, позволило создать условия для активного взаимодействия обучающихся и формирования сообщества единомышленников. Это особенно важно в контексте сложных технических дисциплин, где обмен идеями и решениями конкретных задач существенно повышает качество усвоения материала.

Важным аспектом стало техническое обеспечение курса в системе управления обучением MOODLE, включая создание мультимедийных ресурсов, таких как лекции с разбором физических принципов квантово-размерных эффектов, интерактивные симуляции и шаблоны кода для моделирования. Такое методическое сопровождение позволяет студентам с различным уровнем подготовки эффективно осваивать курс, минимизируя технические барьеры при работе с программным обеспечением. Кроме того, интеграция с внешними инструментами, такими как Jupyter Notebook и GitHub, расширяет возможности для выполнения практических заданий и совместной работы над проектами.

Оценка эффективности курса показала, что сочетание автоматизированных систем контроля с экспертной проверкой проектных работ позволяет объективно оценивать не только теоретические знания студентов, но и их умение применять методы моделирования для решения реальных задач. Автоматизированные тесты и домашние задания по численным расчётам обеспечивают регулярную обратную связь, в то время как проектные работы, такие как моделирование транспортных свойств наноструктур или квантового эффекта Холла, позволяют оценить глубину понимания и креативность обучающихся. Это подтверждает адекватность выбранной системы оценки для формирования профессиональных компетенций в области компьютерного моделирования.

Процесс пилотного тестирования курса выявил необходимость адаптации учебных материалов под конкретные потребности студентов и технические возможности. Обратная связь от обучающихся позволила скорректировать формулировки заданий, улучшить наглядность презентаций и дополнить курс материалами для углублённого изучения отдельных тем, таких как статистическая физика наносистем или моделирование молекулярных структур. Важным выводам стало понимание того, что дистанционные курсы требуют постоянного мониторинга и обновления, особенно в быстро развивающихся областях, таких как нанотехнологии и квантовые вычисления.

Ещё одним значимым результатом разработки дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем стало формирование компетенций, связанных с анализом экспериментальных данных и их сопоставлением с результатами моделирования. Например, задания по моделированию оптических и магнитных свойств наноструктур или сравнению расчётных спектров с экспериментальными данными развивают у студентов критическое мышление и умение интерпретировать научные результаты. Это соответствует современным требованиям к специалистам, которые должны не только владеть инструментами моделирования, но и уметь их применять для решения прикладных задач в научных исследованиях и промышленности.

Важной особенностью курса стало использование междисциплинарного подхода, со-

четающего знания из области квантовой механики, статистической физики, полупроводниковой электроники и оптики. Такой подход позволяет студентам видеть взаимосвязь между различными аспектами моделирования наноструктур, например, между электронными свойствами квантовых точек и их оптическими характеристиками. Это способствует формированию целостного представления о квантово-размерных системах и их приложениях в современных технологиях.

Опыт разработки курса по компьютерному моделированию квантовых систем пониженной размерности подтвердил, что дистанционное обучение в технических дисциплинах требует особого внимания к техническому сопровождению и поддержке студентов. Регулярное обновление учебных материалов, консультационная поддержка и своевременное решение технических проблем с программным обеспечением играют ключевую роль в успешном обучении. В данном случае оказалось необходимым предусмотреть не только инструкции по установке программных пакетов, но и создание резервных вариантов выполнения заданий для студентов с ограниченными вычислительными ресурсами. Курс также продемонстрировал высокую степень соответствия современным требованиям к подготовке специалистов в области нанотехнологий, где востребованными являются навыки работы с численными методами, программным обеспечением и анализом данных. Включение тем, посвящённых моделированию молекулярных систем и одноэлектронных устройств, расширяет горизонты студентов и позволяет им ориентироваться в различных областях применения нанотехнологий, таких как фотоника, спинтроника и квантовые вычисления. В целом, разработка данного дистанционного курса показала, что успешность обучения зависит не только от качества методических материалов, но и от гибкости системы, способности адаптироваться к изменениям в научно-технической сфере и потребностям студентов. Это подтверждает необходимость постоянного мониторинга и совершенствования курса с учётом новых достижений в области моделирования квантово-размерных систем и развития вычислительных технологий. Таким образом, данный опыт может служить основой для создания аналогичных курсов в других областях высокотехнологичного образования.

Дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем построен с использованием модульной технологии построения курса, позволяющей эффективно управлять темпом продвижения по курсу. Разработанный дистанционный курс позволяет применять смешанную технологию преподавания курса компьютерного моделирования квантово-размерных систем в университете. Технология дистанционного обучения становится всё более популярной и востребованной образовательной технологией в условиях непрерывного развития современных образовательных технологий. Технологии дистанционного обучения позволяют успешно использовать их для достижения высоких результатов в изучении курса компьютерного моделирования квантово-размерных систем. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых методик преподавания курса компьютерного моделирования квантово-размерных систем.

Заключение

В настоящей работе проведено всестороннее исследование дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем в системе управления обучением MOODLE. В работе описан результат разработки курса по компьютерному моделированию квантово-размерныхх систем, который готов к началу использования в учебном процессе в университете, позволяет автоматизировать проверку знаний по компьютерному моделированию квантово-размерных систем. Дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных системе, созданный в системе управления обучением MOODLE, способствует систематизации хранения учебного

материала по компьютерному моделированию квантово-размерных систем. При изучении курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем система управления обучением MOODLE привносит то, что кроме основного курса по изучаемой дисциплине, используется материал для подготовки в домашних условиях, который позволяет расширить учебное содержание, а также провести дифференциацию учебного материала в соответствии с индивидуальными потребностями и запросами студентов, изучающих курс компьютерного моделирования квантово-размерных систем. Система управления обучением MOODLE позволяет открывать и закрывать тематические модели в соответствии с временем изучения, что позволяет поддерживать необходимый темп продвижения по курсу компьютерного моделирования квантово-размерных систем.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. проведённый анализ научной литературы по физике квантово-размерных систем показал существование возрастающих потребностей в создании курсов по компьютерному моделированию квантово-размерных систем для различных уровней образования,
2. разработан оригинальный дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, который готов к началу использования в учебном процессе университета,
3. созданные задания и тесты позволяют проводить проверку знаний студентов по курсу компьютерного моделирования квантово-размерных систем в условиях смешанного обучения или дистанционного обучения физике квантово-размерных систем.

Задачи работы решены полностью.

Гипотеза научного исследования, состоящая в том, что если использовать курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, основанный на комбинации теоретических методов и численных методов в процессе изучения квантовой физики квантово-размерных систем, то можно повысить познавательный интерес студентов к физике квантово-размерных систем, подтверждена полностью. В качестве подтверждения гипотезы исследования спроектирован дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, основанный на комбинации теоретических методов и численных методов в процессе изучения физики квантово-размерных систем, позволяющий повысить познавательный интерес студентов к физике и компьютерному моделированию квантово-размерных систем по традиционной, смешанной и дистанционной формам обучения с применением компьютеров.

Разработанный дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем может занять особое место среди дистанционных курсов, предназначенных для студентов физико-математических профилей подготовки университетов. Дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданный в системе управления обучением MOODLE, способен стать эффективным помощником, автоматизирующим наиболее трудоёмкие элементы труда преподавателя в процессе преподавания учебных дисциплин. Созданный дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем позволит планировать, организовывать и проводить изучение теоретического материала курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем в дистанционной или смешанной форме обучения.

Список использованных источников

1. Ren Shang Yuan, Song Jian. A simple scheme for calculating quantum confinement effects in low dimensional systems // Solid state communications. — 1998. — Dec. —

Vol. 109, no. 4. — P. 243–247. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/s0038-1098(98)00565-1.

2. Pellegrini Giovanni, Mattei Giovanni, Mazzoldi Paolo. Finite depth square well model: applicability and limitations // Journal of applied physics. — 2005. — Mar. — Vol. 97, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.1868875.

3. Fu Huaxiang, Wang Lin-Wang, Zunger Alex. Comparison of the $k \cdot p$ and the direct diagonalization approaches for describing the electronic structure of quantum dots // Applied physics letters. — 1997. — Dec. — Vol. 71, no. 23. — P. 3433–3435. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.120421.

4. Mielnik-Pyszczorski Adam, Gawarecki Krzysztof, Machnikowski Paweł. Limited accuracy of conduction band effective mass equations for semiconductor quantum dots // Scientific reports. — 2018. — Feb. — Vol. 8, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-21043-3.

5. Effective approach for strained InAs/GaAs quantum structures / I. Filikhin [et al.] // Physica E: low-dimensional systems and nanostructures. — 2008. — Feb. — Vol. 40, no. 4. — P. 715–723. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physe.2007.08.161.

6. Nair Selvakumar V., Ramaniah Lavanya M., Rustagi Kailash C. Electron states in a quantum dot in an effective-bond-orbital model // Physical Review B. — 1992. — Mar. — Vol. 45, no. 11. — P. 5969–5979. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.45.5969.

7. Gomez-Campos F. M., Rodríguez-Bolivar S., Carceller J. E. Computational improvement of the normalized plane-wave method and its applications in quantum dot studies // Mathematical and computer modelling. — 2010. — Apr. — Vol. 51, no. 7-8. — P. 873–879. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.mcm.2009.08.030.

8. Effective interaction for charge carriers confined in quasi-one-dimensional nanostructures / S. Bednarek [et al.] // Physical Review B. — 2003. — July. — Vol. 68, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.68.045328.

9. Movilla J. L., Pi M., Planelles J. Dielectric confinement in quantum dots of arbitrary shape within the local spin density approximation: Diluted regimes in elongated quantum dots // Journal of applied physics. — 2010. — Sept. — Vol. 108, no. 6. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.3487479.

10. Dick Rainer. A model system for dimensional competition in nanostructures: a quantum wire on a surface // Nanoscale research letters. — 2008. — Apr. — Vol. 3, no. 4. — P. 140–144. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s11671-008-9126-4.

11. Quantum embedding theories to simulate condensed systems on quantum computers / Christian Vorwerk [et al.] // Nature computational science. — 2022. — July. — Vol. 2, no. 7. — P. 424–432. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s43588-022-00279-0.

12. Hong Li, Xiao-Jun Kong. Exciton and donor binding energies in quantum-well wires and quantum dots a fractional-dimensional space approach // Chinese physics. — 2004. — Apr. — Vol. 13, no. 5. — P. 759–764. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/1009-1963/13/5/032.

Сведения об авторах:

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

E-mail: elenailuskina2004@gmail.com

ORCID iD 0009-0001-2593-9829

Web of Science ResearcherID JRW-6162-2023

Original article
PACS 01.40.Di
OCIS 000.20600
MSC 00A79

Development of a course on the computer modeling of low-dimensional quantum systems within the Moodle learning management system

E. A. Ilyushkina

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432000, Ulyanovsk, Russia

Submitted July 15, 2026
Resubmitted July 17, 2026
Published September 30, 2026

Abstract. The results of developing a distance learning course on the computer modeling of low-dimensional quantum systems within the learning management system MOODLE are presented. The results regarding the development of the thematic structure and instructional materials for this course are described.

Keywords: course, distance learning course, computer modeling, reduced-dimensionality system

References

1. Ren Shang Yuan, Song Jian. A simple scheme for calculating quantum confinement effects in low dimensional systems // Solid state communications. — 1998. — Dec. — Vol. 109, no. 4. — P. 243–247. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/s0038-1098(98)00565-1.

2. Hong Li, Xiao-Jun Kong. Exciton and donor binding energies in quantum-well wires and quantum dots a fractional-dimensional space approach // Chinese physics. — 2004. — Apr. — Vol. 13, no. 5. — P. 759–764. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/1009-1963/13/5/032.

3. Quantum embedding theories to simulate condensed systems on quantum computers / Christian Vorwerk [et al.] // Nature computational science. — 2022. — July. — Vol. 2, no. 7. — P. 424–432. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s43588-022-00279-0.

4. Dick Rainer. A model system for dimensional competition in nanostructures: a quantum wire on a surface // Nanoscale research letters. — 2008. — Apr. — Vol. 3, no. 4. — P. 140–144. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s11671-008-9126-4.

5. Pellegrini Giovanni, Mattei Giovanni, Mazzoldi Paolo. Finite depth square well model: applicability and limitations // Journal of applied physics. — 2005. — Mar. — Vol. 97, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.1868875.

6. Effective interaction for charge carriers confined in quasi-one-dimensional nanostructures / S. Bednarek [et al.] // Physical Review B. — 2003. — July. — Vol. 68, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.68.045328.

7. Movilla J. L., Pi M., Planelles J. Dielectric confinement in quantum dots of arbitrary shape within the local spin density approximation: Diluted regimes in elongated quantum dots // Journal of applied physics. — 2010. — Sept. — Vol. 108, no. 6. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.3487479.

8. Effective approach for strained InAs/GaAs quantum structures / I. Filikhin [et al.] // Physica E: low-dimensional systems and nanostructures. — 2008. — Feb. — Vol. 40, no. 4. — P. 715–723. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physe.2007.08.161.

9. Fu Huaxiang, Wang Lin-Wang, Zunger Alex. Comparison of the $k \cdot p$ and the direct diagonalization approaches for describing the electronic structure of quantum dots // Applied physics letters. — 1997. — Dec. — Vol. 71, no. 23. — P. 3433–3435. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.120421.

10. Mielnik-Pyszczorski Adam, Gawarecki Krzysztof, Machnikowski Paweł. Limited accuracy of conduction band effective mass equations for semiconductor quantum dots // Scientific reports. — 2018. — Feb. — Vol. 8, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-21043-3.

11. Nair Selvakumar V., Ramaniah Lavanya M., Rustagi Kailash C. Electron states in a quantum dot in an effective-bond-orbital model // Physical Review B. — 1992. — Mar. — Vol. 45, no. 11. — P. 5969–5979. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.45.5969.

12. Gomez-Campos F. M., Rodríguez-Bolivar S., Carceller J. E. Computational improvement of the normalized plane-wave method and its applications in quantum dot studies // Mathematical and computer modelling. — 2010. — Apr. — Vol. 51, no. 7-8. — P. 873–879. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.mcm.2009.08.030.

Information about authors:

Elena Alekseevna Ilyushkina — 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: elenailuskina2004@gmail.com

ORCID iD 0009-0001-2593-9829

Web of Science ResearcherID JRW-6162-2023

Научная статья
УДК 372.853
ББК 74.48
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Разработка дистанционного курса по гибридной наноплазмонике

В. Д. Однакова [1]

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432000, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 1 июля 2026 года
После переработки 3 июля 2026 года
Опубликована 30 сентября 2026 года

Аннотация. Представлены результаты разработки дистанционного курса по гибридной наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE. Гибридная наноплазмоника является передовым междисциплинарным направлением на стыке нанофотоники, материаловедения и квантовых технологий. Целью исследования является разработка дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, который будет способствовать повышению уровня знаний студентов по гибридной наноплазмонике, качества образования и развития навыков студентов университета в области наноплазмоники. Разработка дистанционного курса по гибридной наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE приобретает особую актуальность в контексте цифровой трансформации образования.

Ключевые слова: курс, дистанционный курс, наноплазмоника, гибридная наноплазмоника, фотоника, нанофотоника, металлическая наноструктура, графен, плазмонный резонанс, наноструктура

Введение

Гибридная наноплазмоника является перспективном научным направлением на стыке нанооптики, плазмоники и материаловедения, изучающее взаимодействие локализованных плазмонных резонансов с другими наноструктурами (полупроводниками, молекулами, сверхпроводниками и магнитными материалами) для создания новых функциональных систем с улучшенными оптическими, электронными и сенсорными свойствами. Гибридная наноплазмоника исследует взаимодействие локализованных плазмонных резонансов металлических наноструктур с другими функциональными материалами — полупроводниками, двумерными кристаллами (графеном, дихалькогениды переходных металлов или соединения переходных металлов с халькогенами), молекулами или

[1] E-mail: lera.zhyravleva73510@mail.ru

сверхпроводниками — для создания систем с синергетически усиленными оптическими, электронными и сенсорными свойствами. Гибридная наноплазмоника представляет собой междисциплинарное направление на стыке оптики, нанофотоники и конденсированного состояния вещества, в котором интеграция различных материалов и структур позволяет достичь уникальных оптоэлектронных свойств, недоступных в классических плазмонных системах на основе благородных металлов. За последние пять лет научные исследования в этой области активно развиваются, демонстрируя прогресс в понимании фундаментальных механизмов взаимодействия света с гибридными наноматериалами, а также в разработке практических оптоэлектронных и квантовых приложений. В основе гибридной наноплазмоники лежат гибридные наноструктуры, такие как плазмонно-полупроводниковые гетеросистемы, металл-диэлектрик-металл наноплазмонные резонаторы и метаматериалы, которые объединяют коллективные колебания свободных электронов в металлах (плазмоны) с уникальными свойствами других наноматериалов, например, квантовыми точками или двумерными материалами, например, графеном. В гибридных наноструктурах плазмоны усиливают локальные электромагнитные поля, усиливая эффекты в сопряжённых материалах, такие как генерация экситонов, перенос заряда или нелинейные оптические процессы. Наноплазмоника активно развивается для применений в ультрачувствительных сенсорах, оптических вычислительных устройствах, оптоэлектронных устройствах (светодиоды, детекторы, лазеры с плазмонным усилением), энергоэффективной оптоэлектронике и катализе, где гибридные эффекты позволяют преодолеть фундаментальные ограничения традиционных плазмонных систем, улучшая, например, интенсивность поверхностного рассеянного света или эффективность фотодетектирования. Важными механизмами являются перенос энергии между плазмонами и экситонами, манипулирование горячими электронами и синхронизация колебательных мод, что открывает пути для создания наноразмерных источников света, модуляторов и логических элементов на основе плазмон-экситонных связей.

Ключевые механизмы включают нелинейные опто-плазмонные взаимодействия, перенос энергии между плазмонами и экситонами, а также манипулирование локальными электромагнитными полями для управления светом на наномасштабе, что открывает возможности для создания миниатюрных лазеров, модуляторов и логических элементов на основе света.

Научная и технологическая актуальность гибридной наноплазмоники и нанофотоники обусловлена её потенциалом для решения глобальных задач, таких как развитие гибкой электроники, квантовых технологий и медицинской диагностики, где интеграция плазмонных и других наноэффектов позволяет создавать устройства с рекордными характеристиками при минимальных энергозатратах.

Применения гибридной наноплазмоники охватывают медицинскую диагностику на основе ультрачувствительного обнаружения молекул, квантовые технологии на основе связи с использованием плазмонных волн и энергетику фототермальных и фотокаталитических системы, делая её ключевым направлением для решения задач в области гибкой электроники, нанофотоники и сенсорики. Особое внимание уделяется масштабируемым методам синтеза гибридных наноструктур (например, литография, самоорганизация, химическое осаждение) и их интеграции в функциональные устройства, что требует междисциплинарного подхода, объединяющего физику, химию и инженерию материалов. Гибридная наноплазмоника расширяет границы классической плазмоники за счёт нелинейных эффектов, когерентных взаимодействий и квантовых явлений, таких как плазмон-экситонные поляритоны или гибридизация с фононами, что открывает перспективы для разработки новых классов оптоэлектронных материалов с рекордными характеристиками, недостижимыми в изолированных системах.

Интеграция гибридной наноплазмоники в современные образовательные платформы, такие как система управления обучением MOODLE, актуальна в связи с растущим спросом на подготовку высококвалифицированных кадров в сфере нанотехнологий и оптоэлектроники, где дистанционное обучение позволяет использовать интерактивные симуляции, виртуальные лаборатории и мультимедийные материалы для моделирования плазмонных эффектов в метаматериалах и наноструктурах.

Разработка дистанционного курса по гибридной наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE приобретает особую актуальность в контексте цифровой трансформации образования, где интеграция интерактивных симуляций (например, плазмонных резонансов в наноструктурах), виртуальных лабораторий и мультимедийных модулей позволяет студентам и аспирантам изучать междисциплинарные концепции квантовой оптики, фотоники и материаловедения в интерактивном формате, повышая глубину понимания сложных физических процессов. Разработка дистанционного курса в системе управления обучением MOODLE отвечает потребностям междисциплинарного подхода, объединяющего физику, материаловедение и инженерию, что обусловлено стремительным развитием прикладных исследований в области гибридных плазмонных систем, таких как сенсоры нового поколения, квантовые устройства и оптическая микроскопия сверхразрешения.

Актуальность темы исследования усиливается ростом спроса на специалистов в области нанотехнологий и оптоэлектроники, где дистанционное обучение с использованием системы управления обучением MOODLE обеспечивает доступ к передовым образовательным ресурсам, включая автоматизированные тесты, проектные задания и анализ реальных данных с использованием программного обеспечения (COMSOL, Lumerical, Python), что готовит выпускников к решению прикладных задач в наукоёмких отраслях. Актуальность темы также связана с необходимостью адаптации образовательных стандартов к новым вызовам цифровизации науки, где виртуальные лабораторные работы, автоматизированные тесты и активные методы обучения (например, проектная деятельность) в системе управления обучением MOODLE повышают эффективность усвоения сложных концепций, таких как локализованные плазмоны, гибридные наноматериалы и их взаимодействие с электромагнитным излучением.

Кроме того, внедрение гибридных образовательных подходов в системе управления обучением MOODLE соответствует современным тенденциям гибридного обучения, объединяя очные лекции с онлайн-модулями, что особенно важно для междисциплинарных дисциплин, таких как наноплазмоника, где необходим баланс между теоретическими знаниями и практическим применением, включая моделирование наноструктур и анализ экспериментальных данных.

Целью исследования является разработка дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, который будет способствовать повышению уровня знаний студентов по гибридной наноплазмонике, качества образования и развития навыков студентов университета в области наноплазмоники.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи:

1. написать обзор научных работ по гибридной наноплазмонике,
2. разработать модульную структуру и содержание дистанционного курса по гибридной наноплазмонике,
3. создать материалы для дистанционного курса, способствующие лучшему пониманию студентами современных концепций наноплазмоники,
4. создать задания и тесты для проверки знаний студентов по курсу гибридной наноплазмоники.

Объектом исследования является курс гибридной наноплазмоники. Предметом ис-

следования является процесс разработки дистанционного курса по гибридной наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE.

В качестве методов исследования используются следующие методы: анализ существующих научных материалов по гибридной наноплазмонике, анализ существующих дистанционных курсов по наноплазмонике и физическим дисциплинам с использованием методов сравнительного анализа и экспертной оценки, методы разработки модульной структуры и содержания дистанционного курса по гибридной наноплазмонике с использованием методов системного анализа и проектирования на основе современных технологий обучения наноплазмонике, методы создания интерактивных и мультимедийных материалов с использованием методов компьютерной графики, анимации и видео, методы тестирования и оценки эффективности разработанного дистанционного курса по гибридной наноплазмонике. В качестве материалов исследования используются учебники и учебные пособия по гибридной наноплазмонике для университетов, учебно-методические материалы по гибридной наноплазмонике, методические рекомендации по разработке дистанционных курсов, примеры успешных дистанционных курсов по гибридной наноплазмонике и смежным физико-техническим дисциплинам, компьютерные программы и инструменты для создания интерактивных и мультимедийных материалов по гибридной наноплазмонике.

Научная новизна исследования заключается в создании нового дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, учитывающего современные тенденции и требования к образованию физико-математического профиля, а также в применении инновационных методов и технологий для разработки дистанционного курса по гибридной наноплазмонике.

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

Теоретическая значимость научного исследования заключается в систематизации и обобщении существующих подходов к разработке дистанционных курсов по гибридной наноплазмонике, а также в определении основных принципов и требований созданию дистанционных курсов по гибридной наноплазмонике. Практическая значимость исследования состоит в возможности использования разработанного дистанционного курса по гибридной наноплазмонике в образовательном процессе университетов, что позволит повысить качество образования по физико-техническим дисциплинам и развить навыки студентов университетов.

Обзор работ по гибридной наноплазмонике

Гибридная наноплазмоника является передовым междисциплинарным направлением на стыке нанофотоники, материаловедения и квантовых технологий. Гибридная наноплазмоника представляет собой междисциплинарное поле, где сочетаются наноинженерия, материаловедение и физика. Гибридная наноплазмоника является развивающейся областью на стыке фотоники, материаловедения и нанотехнологий, которая стремится объединить плазмонные (металлические) наноструктуры с диэлектрическими, полупроводниковыми или другими функциональными материалами для создания синергетических оптических свойств, которых ни один из компонентов не может достичь по отдельности. Гибридная наноплазмоника изучает взаимодействие электромагнитного излучения с коллективными колебаниями электронов (плазмонами) в металлических наноструктурах, объединенных с другими функциональными материалами. Основным преимуществом наноплазмоники является усиление оптических эффектов, модуляция

свойств через внешние поля (свет, магнитное поле) и интеграция с современными технологиями (фотоника, спинтроника, наноинженерия). Обычные плазмонные структуры (например, металлические наночастицы или волноводы) способны сильно локализовать свет на субволновых масштабах, но обладают существенным недостатком — высокими омическими потерями, из-за чего свет быстро затухает. Основная идея заключается в преодолении фундаментальных ограничений каждого отдельного компонента — высоких диссипативных потерь металлов и дифракционные ограничения диэлектриков — путём создания гибридных систем, которые обеспечивают «лучшее из обоих миров» @auxrussian@auxenglish[1, 2].

Плазмонные наноструктуры (обычно изготавливаемые из Au, Ag, Cu или Al) используют явление локализованного поверхностного плазмонного резонанса — коллективного колебания электронов зоны проводимости при возбуждении светом. Локализованный поверхностный плазмонный резонанс позволяет чрезвычайно сконцентрировать электромагнитную энергию в субволновых объёмах, значительно ниже дифракционного предела, и приводит к резкому усилению локального поля [3, 4]. Однако это имеет свою цену: внутренние омические (диссипативные) потери в металлах, которые приводят к существенному рассеиванию энергии в виде тепла и ограничивают длину распространения поверхностных плазмон-поляритонов [2, 5].

Диэлектрические наноструктуры, изготовленные из полупроводников с высоким показателем преломления (например, Si, GaAs, ZnS, TiO_2), поддерживают резонансы Ми — как электрические, так и магнитные — с гораздо меньшими диссипативными потерями, но они не могут удерживать свет в объёмах, значительно меньших по длине волны, из-за дифракционного предела [2, 5]. Гибридные (металл-диэлектрические) наноструктуры заполняют этот пробел: они объединяют сильную локализацию поля, характерную для плазмоники, с резонансами диэлектриков с низкими потерями и высоким коэффициентом добротности (Q), что позволяет осуществлять беспрецедентный контроль над взаимодействием света и материи в наномасштабе [2, 6, 7].

Один из основных классов гибридных систем объединяет плазмонные наночастицы (например, золотые наностержни, наносферы) с диэлектрическими фотонными резонаторами или резонаторами Фабри-Перо. Барт и др. [6] продемонстрировали гибридный резонатор, в котором отдельные золотые наночастицы были детерминированно расположены на фотонном кристалле Si_3N_4 с помощью наноманипуляций атомной силовой микроскопии. Плазмонный компонент обеспечивал сильно локализованные «горячие точки» поля, в то время как фотонный кристалл сохранял высокую добротность ($Q \approx 900$). Связь между двумя резонансами приводила к линиям Фано и эффективности связи $\beta \approx 40\,\%$ от плазмонной наноантенны в моду резонатора, что приводило к суммарному коэффициенту усиления Пурселла ≈ 10 раз по сравнению с голым резонатором [6].

Аналогично, Ли с соавторами [3] сообщили о вертикальном гибридном плазмонно-фотонном резонаторе, состоящем из золотых наносфер, осажденных на микрорезонаторе Фабри-Перо SiO_2/Si. Благодаря модификации латеральной ближнеполевой связи мономеров и димеров наносфер Au, различные выходные моды могут быть избирательно усилены из одной и той же полости, демонстрируя, что геометрия плазмонной связи может быть использована в качестве компактной стратегии оптической модуляции с шириной линии моды, уменьшенной с ≈ 61 нм (чистый локализолванный поверхностных плазмонный резонанс) до ≈ 28 нм [3].

Оултон и др. первыми разработали концепцию гибридных плазмонных волноводов, состоящих из полупроводниковой нанопроволоки с высоким показателем преломления (например, CdS, Si), отделенной от металлической пленки наноразмерным диэлектрическим разделителем с низким показателем преломления (например, SiO_2, MgF_2) [5, 7]. В

этих структурах направленная мода сжимается в нанометровый зазор с низким показателем преломления, сочетая глубоко субволновое ограничение (площади мод до $\lambda^2/135$) с длинами распространения на несколько порядков больше, чем в чистых плазмонных волноводах [1, 5]. Такая конструкция позволила создавать плазмонные нанолазеры при комнатной температуре с объёмами мод, сопоставимыми с наименьшими размерами затворов транзисторов, и значительным усилением Пурселла — шестикратным увеличением скорости спонтанного излучения по сравнению с лазерами, использующими только фотонные структуры [5].

Янг и др. [7] предложили гибридную фотонно-плазмонную кристаллическую наноразонаторную структуру, интегрировав одномерную структуру фотонного кристалла в кремниевый волновод такой гибридной системы, с наноразмерным воздушным зазором между волноводом и серебряной подложкой. Эта полость достигла добротности $Q \approx 330$ и чрезвычайно глубокого субволнового объема моды V_m, равного $0.0056\lambda^3$, что дало исключительное отношение Q/V_m, равное $60000\lambda^{-3}$, и соответствующий фактор Пурселла ≈ 4560 [7].

Цзян и др. [4] представили всесторонний обзор гибридных наноструктур (плазмонный металл)/полупроводник. К ним относятся: частицы с ядром и оболочкой (например, ядро из золота с оболочками из TiO_2, Cu_2O, ZnS или CdS), частицы Януса (гантелевидные) и декорированные наноструктуры (полупроводниковые нанопроволоки или нанопластины, декорированные плазмонными металлическими наночастицами). Полупроводниковым компонентом может быть оксид (TiO_2, ZnO, Cu_2O), халькогенид (CdS, PbS, CdSe) или другой функциональный материал. Локализованный поверхностный плазмонный резонанс металлического компонента может быть настроен в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах путём контроля размера ядра, толщины оболочки и морфологии. Критически важно отметить, что в наноструктурах (ядро из золота)/(оболочка из ZnS) наблюдались резонансы Фано, возникающие в результате интерференции между узким локализованным поверхностным плазмонным резонансом металла и широким континуумом рассеяния полупроводниковой оболочки с высоким показателем преломления, что открывает новые возможности для управления формой спектральных линий [4].

Лепешов с соавторами в статье [2] рассматривают различные гибридные металл-диэлектрические наноантенны, которые сочетают плазмонные наночастицы с диэлектрическими наночастицами с высоким показателем преломления. Например, кремниевая наносфера, соединенная с золотым наностержнем, поддерживает до четырёх различных каналов рассеяния (гибридизированные магнитно-электрические моды диэлектрика и плазмонные моды металла), что позволяет пространственно разделять оптические сигналы на разных частотах. Такие наноантенны использовались для однонаправленного рассеяния (источники Гюйгенса), направленного запуска поверхностного плазмон-поляритона в плазмонные волноводы и усиления нелинейной оптической генерации [2].

Критически важным аспектом гибридной плазмоники является понимание того, как энергия перетекает через плазмонную/неплазмонную границу раздела. Ашалли и др. [8] обсуждают фундаментальные процессы возбуждения и распада плазмонов в гибридных наноструктурах. При возбуждении поверхностных плазмон-поляритонных резонансов коллективные электронные колебания затухают в течение ≈ 10 фс либо за счёт рассеяния фотонов, либо за счёт образования энергетических электронно-дырочных пар. В чистых монометаллических наночастицах эти электронно-дырочные пары образуются по всему объёму. Однако, когда к плазмонной поверхности прикрепляется неплазмонный материал (например, тонкая платиновая оболочка, полупроводниковый слой или хемосорбированные молекулы), открываются новые межфазные электронные состоя-

ния, создающие быстрые, локализованные каналы рассеивания энергии [8].

Крайне важно, что первоначальное образование энергетических пар электронов и дырок преимущественно локализуется на плазмонно-неплазмонной границе раздела или непосредственно внутри прикрепленного материала. Это явление обусловлено тремя факторами: высоким локализованным резонансом поверхностных плазмонов, вызывающим осциллирующее электрическое поле на поверхности, механизмом распада Крейбига (опосредованным поверхностью), характерным для малых наночастиц, и наличием прямых электронных переходов с сохранением импульса в неплазмонной компоненте [8]. Это понимание бросает вызов упрощённым «двухтемпературным» термическим моделям и открывает возможности для извлечения горячих носителей через барьеры Шоттки в металл/полупроводниковых переходах до их термализации, что находит применение в фотокатализе, фотовольтаике и фотодетектировании [8].

Гибридные плазмонные волноводы, изготовленные из нелинейного полупроводника (например, AlGaInP) с резонансной плазмонной полостью (плёнка Ag + прослойка Al_2O_3), достигли рекордно высокой эффективности преобразования генерации второй гармоники и суммарной частоты на телекоммуникационных длинах волн (1.3−1.6 мкм), при этом площади мод уменьшились до $\lambda^2/135$, а объёмы мод – до $\lambda^3/206$ [1]. Сильное ограничение поля и усиление электрического поля, обеспечиваемые плазмонной полостью, имеют важное значение — соответствующая чисто диэлектрическая система показала практически незаметное нелинейное преобразование [1].

Гибридные плазмонные лазеры (спайсеры) на основе конфигураций из нанопроволок CdS/нанолазера MgF_2/плёнки Ag продемонстрировали генерацию лазерного излучения при комнатной температуре в масштабах, значительно меньших длины волны, с повышенной скоростью спонтанного излучения [5]. Гибридный режим жёстко локализован в диэлектрическом плазмонном излучателе толщиной в нанометр, что минимизирует потери в металле, сохраняя при этом сильную локализацию поля.

Сильные эванесцентные поля и локальное усиление поля в гибридных нанопроволочных волноводах позволяют проводить высокочувствительное химическое и биологическое зондирование. Плазмонные нанопроволоки (например, нанопроволоки Ag) использовались для внутриклеточного поверхностно-усиленного рамановского рассеяния, а гибридные фотонно-плазмонные волноводы обещают чувствительность к отдельным молекулам без использования меток [5, 8].

Гибридные наноструктуры металл/полупроводник, такие как наночастицы Au на TiO_2 или ZnO, используют плазмонно-усиленное поглощение света и инжекцию горячих электронов через барьер Шоттки металл-полупроводник для запуска фотокаталитических реакций (например, расщепление воды, восстановление CO_2, разложение загрязняющих веществ) с эффективностью, распространяющейся на видимый и ближний инфракрасный спектральные области за пределы запрещённой зоны полупроводника [4, 8].

В работах [2, 6] показано, что гибридные плазмонно-фотонные резонаторы служат платформами для квантовой электродинамики в резонаторах, предлагая потенциал для эффективных источников одиночных фотонов и нанолазеров. Объединяя фотонный резонатор с высокой добротностью (для спектральной фильтрации и хранения фотонов) с плазмонной наноантенной (для сильного ограничения поля и повышения скорости излучения), гибридные системы могут достигать высоких факторов Пурселла, сохраняя при этом эффективный сбор фотонов [2, 6].

Наноплазмоника представляет собой мощную парадигму управления оптическим излучением в наноразмерном масштабе за счёт синергетического сочетания плазмонных и диэлектрических или полупроводниковых материалов. Наноплазмоника развилась от концептуальных предложений до экспериментально продемонстрированных устройств

— нанолазеров, нелинейных преобразователей частоты, сверхчувствительных датчиков и эффективных фотокатализаторов. Будущие задачи включают масштабирование методов изготовления (например, точное размещение наночастиц, крупномасштабная литография), снижение потерь в металле за счёт усовершенствованного проектирования материалов (например, эпитаксиальные металлические плёнки, диэлектрики с низкими потерями) и разработку количественных теоретических моделей, которые отражают пространственно и временно неоднородный характер потока энергии в этих многокомпонентных системах [2, 5, 8].

Несмотря на колоссальный потенциал, наноплазмоника сталкивается с рядом фундаментальных физических задач. Главной из этих задач является технологическая сложность точного позиционирования нанокомпонентов на квантовом уровне и поиск путей для минимизации тепловыделения при сильной локализации света. По мере решения этих задач гибридные наноплазмонные устройства готовы стать ключевыми строительными блоками в интегрированных фотонных схемах, квантовой обработке информации и технологиях сбора энергии.

Гибридная наноплазмоника демонстрирует высокий потенциал для революционных прорывов в оптоэлектронике, катализе и биотехнологиях благодаря уникальной способности сочетать плазмонные эффекты с функциональными свойствами других материалов, такими как полупроводники, двухмерных материалы и магнетики. Синергетическое взаимодействие между компонентами гибридных систем, например, усиление локальных электромагнитных полей или управление спиновыми состояниями, которое открывает новые возможности для создания сверхчувствительных сенсоров, высокоэффективных фотокатализаторов и компактных оптоэлектронных устройств. Однако дальнейшее развитие наноплазмоники требует решения ключевых вызовов, среди которых стабильность наноструктур, масштабируемость технологий и оптимизация их биохимической или химической совместимости для практического применения. В перспективе, интеграция гибридной наноплазмоники с передовыми методами, такими как квантовые технологии, трёхмерная нанофабрикация и машинное обучение, может ускорить переход от лабораторных прототипов к коммерчески жизнеспособным решениям в медицине, энергетике и информационных технологиях.

Гибридная наноплазмоника демонстрирует уникальные возможности для управления светом на наномасштабах, сочетая преимущества металлических плазмонных структур с уникальными свойствами диэлектриков, полупроводников и двумерных материалов. Современные исследования показывают, что такие системы могут быть использованы для создания сверхчувствительных сенсоров, эффективных оптоэлектронных устройств и квантовых технологий. Однако для практического внедрения необходимо решить задачи масштабируемости, управления потерями и теоретического описания сложных взаимодействий. Будущие разработки в области плазмоники, несомненно, откроют новые горизонты для оптоэлектроники, квантовых вычислений, делая гибридную наноплазмонику одним из наиболее перспективных направлений современной науки о материалах.

Результаты разработки структуры дистанционного курса по гибридной наноплазмонике

Разработка дистанционного курса по гибридной наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE требует последовательного подхода, обеспечивающего глубокое усвоение материала, развитие навыков моделирования и практического применения полученных знаний. Для создания эффективного курса общим объёмом 180 академических часов необходимо начать с тщательной концептуализации его структуры и методики преподавания.

Формирование концепции дистанционного курса по гибридной наноплазмонике начинается с определения целевой аудитории и уровня подготовки слушателей, предполагая, что у них уже имеются базовые знания в области физики и электроники, но отсутствует опыт работы с современными методами моделирования наноструктур. Важно четко сформулировать образовательные цели: развитие аналитического мышления, навыков работы с программным обеспечением для моделирования и понимание физических принципов гибридной наноплазмоники.

Создание образовательного сценария предполагает разработку логически последовательного изложения материала, начиная с основных понятий и заканчивая применением сложных численных методов. Первые темы должны быть посвящены теоретическим основам наноплазмоники и электродинамике, чтобы слушатели могли постепенно перейти к изучению гибридных систем и методов их моделирования. Например, тема по введению в наноплазмонику должна включать исторический обзор, основные понятия и актуальные тенденции развития области, чтобы мотивировать слушателей на дальнейшее изучение предмета.

Разработка модульной структуры дистанционного курса по гибридной наноплазмонике подразумевает деление всего материала на логически отдельные блоки, каждый из которых посвящён определённой теме или набору тем. В каждом блоке необходимо предусмотреть теоретическую часть, включающую лекционные материалы, презентации и тексты, а также практические задания, которые помогут слушателям закрепить полученные знания. Например, после изучения темы по оптическим свойствам металлов и диэлектриков целесообразно предложить задание по моделированию дисперсионных соотношений с использованием базовых формул.

Создание учебно-методических материалов включает подготовку лекционных слайдов, текстов лекций, раздаточных материалов и заданий для самостоятельной работы. Важно, чтобы все материалы были структурированы и легко доступны для скачивания, а также адаптированы для дистанционного формата. Особое внимание следует уделять наглядным материалам, таким как графики, схемы и анимации, которые помогут слушателям лучше понять сложные физические процессы.

Разработка практических заданий и лабораторных работ является одним из ключевых этапов курса, поскольку позволяет слушателям применить теоретические знания на практике. Например, после изучения методов конечных элементов и конечных разностей во времени можно предложить задание по моделированию плазмонных наноантенн в программном обеспечении COMSOL или Lumerical. Это поможет развить навыки работы с современным инструментарием и даст возможность оценить эффективность различных конфигураций наноструктур.

Интеграция интерактивных элементов для повышения степени вовлечённости слушателей курса предполагает использование онлайн-конференций, форумов и тестов. Например, после каждой значимой темы можно проводить вебинары, где преподаватели обсудят сложные вопросы и ответят на вопросы слушателей. Также полезно использовать форумы для обсуждения практических заданий и обмена опытом между участниками курса.

Создание системы контроля и оценивания должно быть основано на комплексном подходе, включая текущий контроль знаний через тесты, выполнение практических заданий и итоговый контроль через выполнение проектной работы. Например, слушатели могут получить задание по разработке модели гибридной наноструктуры с использованием нескольких инструментов, таких как Python, R и COMSOL, что позволит оценить их интегральные знания и навыки.

Организация обратной связи от слушателей и внесение коррективов в дистанционный курс является важным этапом, так как позволяет оперативно реагировать на

возникающие сложности и улучшать материал. Регулярные опросы и анкетирования помогут выявить проблемные темы и скорректировать структуру курса для повышения его эффективности.

Разработка механизмов взаимопомощи и сопровождения подразумевает создание сообществ поддержки, где слушатели могут делиться своими успехами и трудностями. Например, можно организовать чаты или группы в социальных сетях, где участники смогут обсуждать задания, делиться полезными ресурсами и поддерживать друг друга.

Подготовка преподавателей к ведению дистанционного курса включает обучение работе с платформой MOODLE, методами эффективного обучения на расстоянии и созданию интерактивных материалов. Преподаватели должны быть готовы отвечать на вопросы слушателей в онлайн-режиме и обеспечивать качественное сопровождение учебного процесса.

Пилотное тестирование курса до его официального запуска поможет выявить и устранить возможные недостатки. Пилотная группа слушателей позволит оценить эффективность учебных материалов, сложность практических заданий и вовлечённость участников, что в свою очередь поможет скорректировать курс перед масштабным запуском.

Маркетинг и продвижение курса включает разработку информационных материалов о курсе, его преимуществах и целевой аудитории. Необходимо создать сайт или страницу в социальных сетях, где потенциальные слушатели смогут получить информацию о программе, расписании и условиях обучения. Также полезно использовать партнерские соглашения с другими образовательными учреждениями или компаниями для привлечения целевой аудитории.

Запуск и постоянное сопровождение дистанционного курса по гибридной наноплазмонике предполагает организацию регулярных онлайн-консультаций и вебинаров, обновление материалов на основе обратной связи от слушателей. Важно поддерживать активное взаимодействие с участниками курса, чтобы они чувствовали поддержку и мотивированность на протяжении всего периода обучения.

Разработка дистанционного курса по гибридной наноплазмонике требует системного подхода, сочетающего теоретическое обучение, практическую работу и активное взаимодействие слушателей друг с другом и с преподавателями. В результате слушатели должны не только получить глубокие знания в области гибридной наноплазмоники, но и развить практические навыки работы с современными инструментами моделирования, что позволит им успешно применять полученные знания в научной и инженерной деятельности.

Первая тема посвящена изучению введения в наноплазмонику. Вторая тема посвящена изучению электродинамики на основе уравнений Максвелла в нанометровом масштабе. Третья тема посвящена изучению оптических свойств металлов и диэлектриков. Четвёртая тема посвящена изучению гибридных металл-диэлектрических систем и наноструктур. Пятая тема посвящена изучению плазмон-фотонных кристаллов и метаматериалов. Шестая тема посвящена изучению гибридных систем с квантовыми точками и молекулами. Седьмая тема посвящена изучению термооптических эффектов в гибридных наноструктурах. Восьмая тема посвящена изучению аналитических методов на основе электрического дипольного приближения и теории Ми. Девятая тема посвящена изучению численных методов моделирования. Десятая тема посвящена изучению метода матрицы плотности и квантово-механического моделирования гибридных систем. Одиннадцатая тема посвящена изучению статистических методов и анализа данных в Python и R. Двенадцатая тема посвящена изучению фотоники и лазеров на основе гибридных лазерных структур. Тринадцатая тема посвящена изучению применений в сенсорике для моделирования плазмонных сенсоров. Четырнадцатая тема посвящена

изучению нелинейных эффектов гибридной наноплазмоники. Пятнадцатая тема посвящена изучению комбинированного использования всех инструментов (Python + R + COMSOL) для моделирования структур гибридной наноплазмоники.

Для успешного педагогического проектирования дистанционного курса по гибридной наноплазмонике объёмом 180 академических часов необходимо последовательно проходить этапы, каждый из которых логически обоснован и взаимосвязан с предыдущими и последующими шагами. Начальный этап предполагает проведение анализа образовательных потребностей и определение целевой аудитории, поскольку это закладывает основу для формирования целей и задач курса. Учитывая, что слушатели, скорее всего, уже обладают базовыми знаниями в области физики и электроники, но не имеют опыта в области наномасштабного моделирования, необходимо сформулировать учебные цели с акцентом на развитие прикладных навыков и аналитического мышления, а также понимание физических принципов гибридных наносистем.

После определения целевой аудитории и образовательных целей следует разработать концептуальную модель курса, основу которой составляют его образовательные цели, структура и методические подходы. Концептуальная модель должна включать не только последовательность изложения тем, но и методы оценки знаний, а также механизмы обратной связи для оперативной коррекции учебного процесса. Например, темы, связанные с численными методами моделирования, должны быть тесно интегрированы с практической деятельностью, чтобы слушатели могли сразу применить изучаемые методы на реальных задачах.

Сразу после концептуализации курса необходимо разработать модульную структуру дистанционного курса, где каждая из пятнадцати тем будет представлена в виде отдельных учебных модулей. Каждый модуль должен содержать теоретическую базу, практические задания и материалы для самостоятельной работы, включая лекции, примеры решения задач, интерактивные симуляции и наборы данных для анализа. Например, тематический модуль по численным методам моделирования должен начинаться с теоретического обоснования метода конечных элементов и метода конечных элементов во временной области, а затем переходить к практическим заданиям в программных пакетах COMSOL и Lumerical, где слушатели смогут смоделировать оптические свойства наноструктур.

На следующем этапе требуется создать учебно-методические материалы, которые будут использоваться в процессе обучения. Материалы должны быть адаптированы под дистанционный формат, включать в себя тексты лекций, презентации с анимациями и графиками, а также раздаточные материалы с ключевыми формулами и алгоритмами. Особое внимание следует уделить наглядности и доступности содержания, так как дистанционная форма обучения требует повышенного уровня визуализации сложных физических процессов. Также необходимо предусмотреть библиографический список научных статей и учебных пособий для углубленного изучения тем.

Одновременно с разработкой учебных материалов следует создать систему контроля и оценивания знаний, которая будет учитывать как текущие успехи слушателей, так и итоговые результаты. Для этого можно использовать комбинацию тестов с автоматизированной проверкой, выполнение практических работ, прохождение лабораторных заданий и выполнение проектных работ. Например, для оценки понимания численных методов слушатели могут решать задачи в COMSOL с последующей защитой результатов в виде отчетов. Итоговая аттестация может включать комплексное задание по моделированию гибридной наноструктуры с использованием Python, R и COMSOL, что позволит оценить интегральные знания и навыки.

После разработки модулей и системы оценивания необходимо организовать интерактивные элементы, которые повысят вовлечённость слушателей в учебный процесс. Для

этого можно использовать форумы для обсуждения теоретических вопросов и практических заданий, онлайн-конференции, где преподаватели будут отвечать на вопросы слушателей, а также совместные вебинары по ключевым темам. Например, после изучения модуля о плазмон-фотонных кристаллах можно организовать вебинар с приглашёнными экспертами в области метаматериалов для обсуждения актуальных исследований и применений таких систем.

Далее требуется провести пилотное тестирование курса с ограниченной группой слушателей для выявления возможных проблем и оценки эффективности учебных материалов. На этом этапе важно собрать обратную связь от студентов и преподавателей, чтобы выявить слабые места в структуре курса, сложность отдельных тем и уровень практических заданий. На основе собранной информации можно внести коррективы в учебные материалы, скорректировать сроки выполнения заданий и уточнить методические рекомендации для преподавателей.

После завершения пилотного тестирования необходимо подготовить преподавателей к ведению дистанционного курса. Это включает обучение работе с платформой MOODLE, методам эффективного обучения на расстоянии и созданию интерактивных материалов. Преподаватели должны быть обучены проводить онлайн-консультации, оценивать работы студентов и поддерживать вовлечённость слушателей на протяжении всего курса. Также важно организовать систему поддержки преподавателей, где они смогут делиться опытом и получать рекомендации по решению возникающих проблем. Параллельно с подготовкой преподавателей следует заняться разработкой механизмов взаимопомощи и сопровождения для слушателей. Это могут быть группы поддержки в социальных сетях или специализированные чаты, где студенты смогут обсуждать задания, делиться ресурсами и оказывать взаимопомощь. Такие механизмы способствуют формированию сообщества, что повышает мотивацию слушателей и улучшает результаты обучения.

Завершающий этап перед запуском курса предполагает маркетинг и продвижение образовательной программы. Необходимо разработать информационные материалы, такие как описание курса, программа обучения, условия допуска и требования к итоговым работам. Одновременно следует создать сайт или страницы в социальных сетях, где потенциальные слушатели смогут получить полную информацию о курсе, а также оставить заявку на участие. Важно также установить партнерские связи с научными учреждениями и компаниями, работающими в области нанотехнологий, чтобы привлечь целевую аудиторию и повысить престиж курса.

После запуска курса необходимо обеспечить его постоянное сопровождение, включающее проведение регулярных вебинаров, онлайн-консультаций и обновление учебных материалов на основе обратной связи от слушателей. Важно поддерживать активное взаимодействие с участниками курса, чтобы они чувствовали поддержку и были мотивированы на протяжении всего обучения. На этом этапе также полезно организовывать семинары по итогам прохождения модулей и итоговые конференции, где студенты смогут представить результаты своих проектных работ. Таким образом, педагогическое проектирование дистанционного курса по гибридной наноплазмонике требует системного подхода, учитывающего как теоретическую подготовку, так и практическое применение знаний. Важно обеспечить сбалансированное сочетание теоретического обучения, практических заданий и интерактивного взаимодействия, чтобы студенты не только усвоили материал, но и приобрели навыки, необходимые для дальнейшей научной деятельности.

Результаты разработки материалов дистанционного курса по гибридной наноплазмонике

Первая лекция посвящена изучению введения в наноплазмонику. Вторая лекция посвящена изучению электродинамики на основе уравнений Максвелла в нанометровом масштабе. Третья лекция посвящена изучению оптических свойств металлов и диэлектриков. Четвёртая лекция посвящена изучению гибридных металл-диэлектрических систем и наноструктур. Пятая лекция посвящена изучению плазмон-фотонных кристаллов и метаматериалов. Шестая лекция посвящена изучению гибридных систем с квантовыми точками и молекулами. Седьмая лекция посвящена изучению термооптических эффектов в гибридных наноструктурах. Восьмая лекция посвящена изучению аналитических методов на основе электрического дипольного приближения и теории Ми. Девятая лекция посвящена изучению численных методов моделирования. Десятая лекция посвящена изучению метода матрицы плотности и квантово-механического моделирования гибридных систем. Одиннадцатая лекция посвящена изучению статистических методов и анализа данных в Python и R. Двенадцатая лекция посвящена изучению фотоники и лазеров на основе гибридных лазерных структур. Тринадцатая лекция посвящена изучению применений в сенсорике для моделирования плазмонных сенсоров. Четырнадцатая лекция посвящена изучению нелинейных эффектов гибридной наноплазмоники. Пятнадцатая лекция посвящена изучению комбинированного использования всех инструментов (Python + R + COMSOL) для моделирования структур гибридной наноплазмоники.

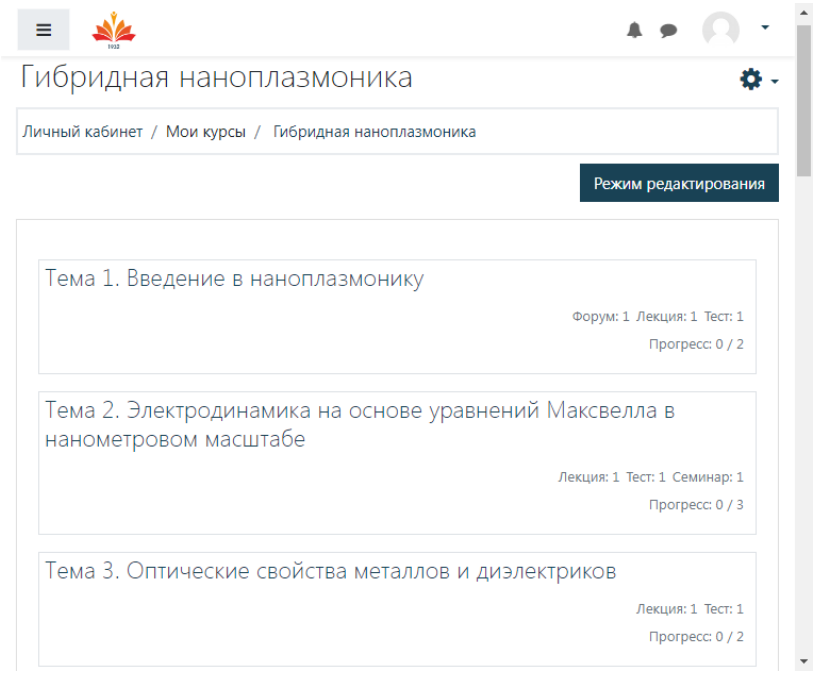


Рис. 1. Страница тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 1 приведено изображение страницы тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

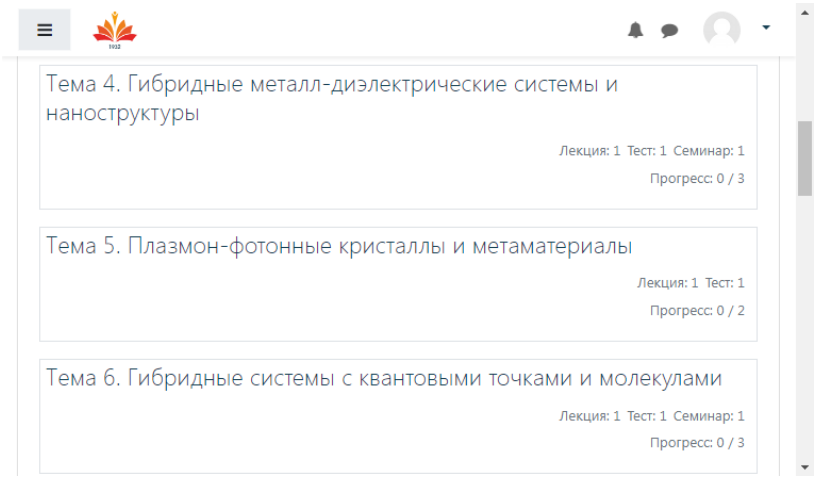


Рис. 2. Страница тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

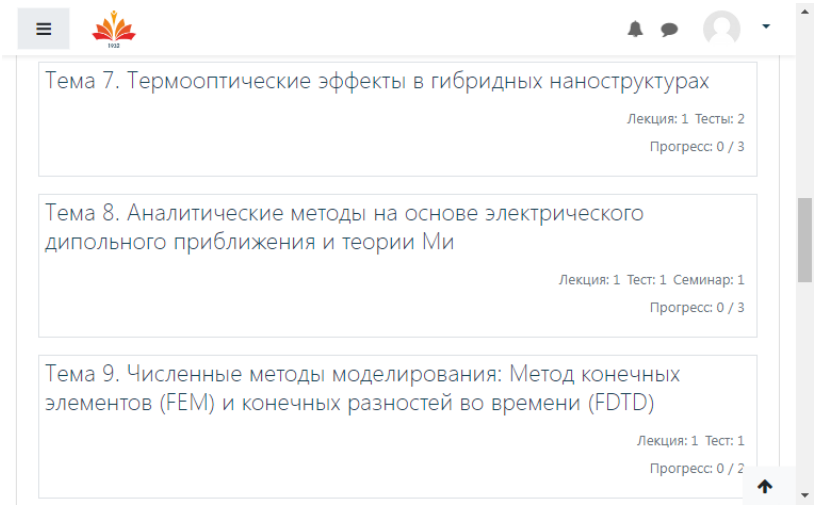


Рис. 3. Страница тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 приведено изображение страницы тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение страницы тематических модулей четвёртой зачётной единицы дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 5 приведено изображение страницы тематических модулей пятой зачётной единицы дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 6 приведено изображение страницы элементов первой темы дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 7 приведено изображение страницы элементов второй темы дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

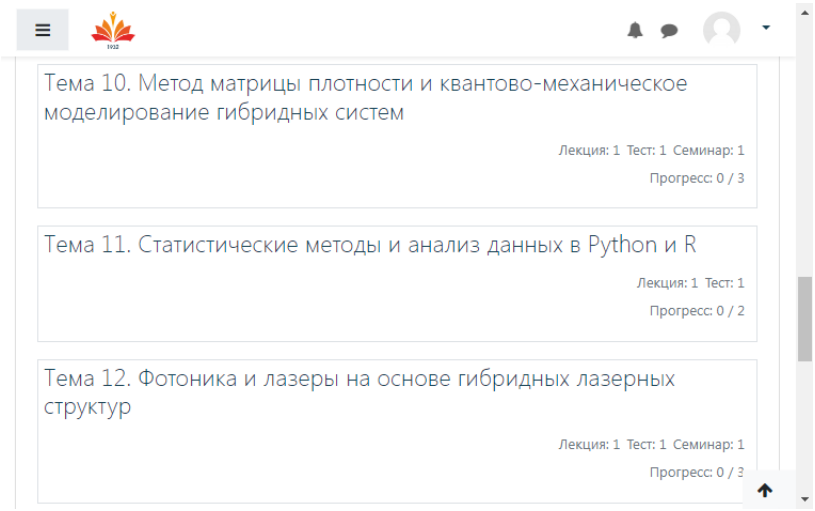


Рис. 4. Страница тематических модулей четвёртой зачётной единицы дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

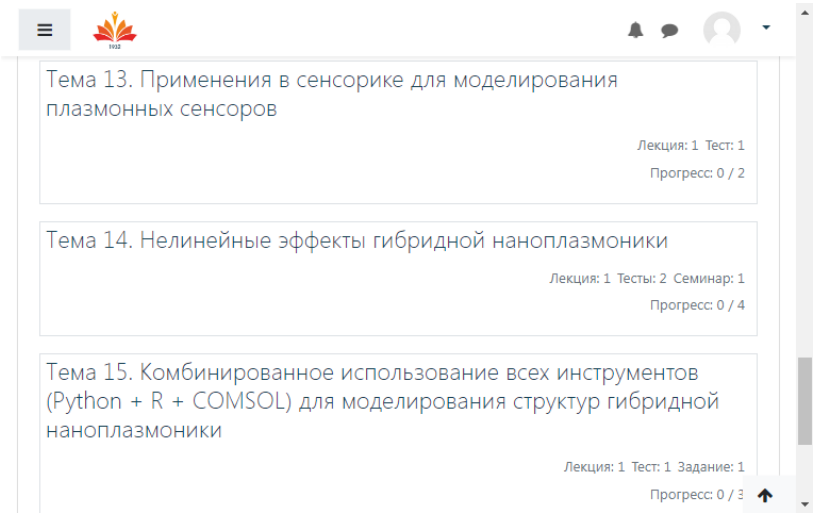


Рис. 5. Страница тематических модулей пятой зачётной единицы дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 8 приведено изображение страницы элементов третьей темы дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

Первое занятие проводится в форме теста по введению в наноплазмонику. Второе занятие проводится в форме теста по электродинамике на основе уравнений Максвелла в нанометровом масштабе. Третье занятие проводится в форме семинара по электродинамике на основе уравнений Максвелла в нанометровом масштабе. Четвёртое занятие проводится в форме теста по оптическим свойствам металлов и диэлектриков. Пятое занятие проводится в форме теста по гибридным металл-диэлектрическим системам и наноструктурам. Шестое занятие проводится в форме семинара по гибридным металл-диэлектрическим системам и наноструктурам. Седьмое занятие проводится в форме теста по плазмон-фотонным кристаллам и метаматериалам. Восьмое занятие проводится в форме теста по гибридным системам с квантовыми точками и молекулами. Девятое занятие проводится в форме семинара по гибридным системам с квантовы-

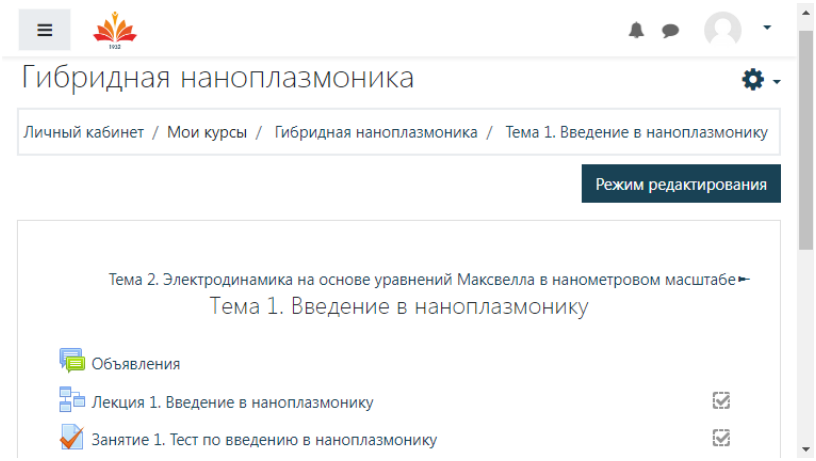


Рис. 6. Страница элементов первой темы дистанционного курса по гибридной нанoплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

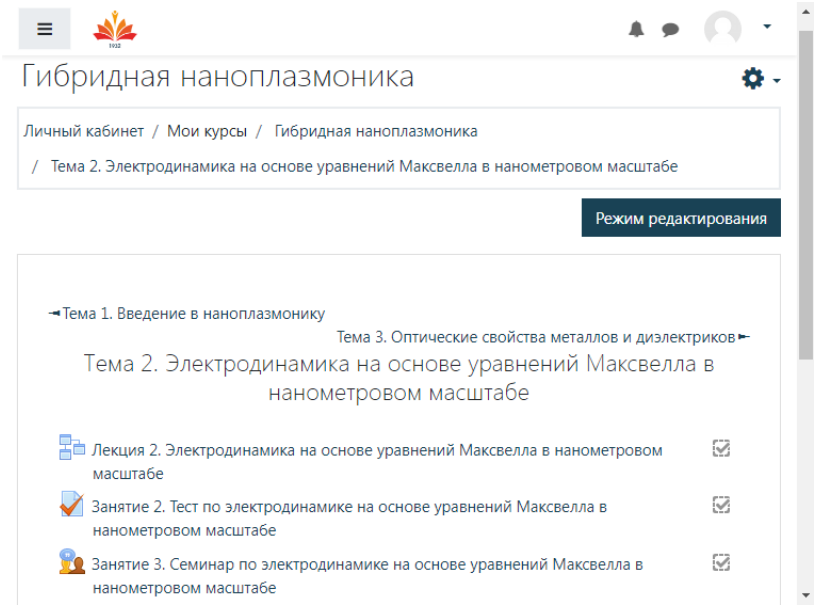


Рис. 7. Страница элементов второй темы дистанционного курса по гибридной нанoплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

ми точками и молекулами. Десятое занятие проводится в форме теста по термооптическим эффектам в гибридных наноструктурах. Одиннадцатое занятие проводится в форме первой контрольной работы. Двенадцатое занятие проводится в форме теста по аналитическим методам на основе электрического дипольного приближения и теории Ми. Тринадцатое занятие проводится в форме семинара по аналитическим методам на основе электрического дипольного приближения и теории Ми. Четырнадцатое занятие проводится в форме теста по численным методам моделирования. Пятнадцатое занятие проводится в форме теста по методу матрицы плотности и квантово-механическое моделирование гибридных систем. Шестнадцатое занятие проводится в форме семинара по методу матрицы плотности и квантово-механическое моделирование гибридных систем. Семнадцатое занятие проводится в форме теста по статистическим методам и анализу данных в Python и R. Восемнадцатое занятие проводится в форме теста по фотонике и лазерам на основе гибридных лазерных структур. Девятнадцатое занятие проводится

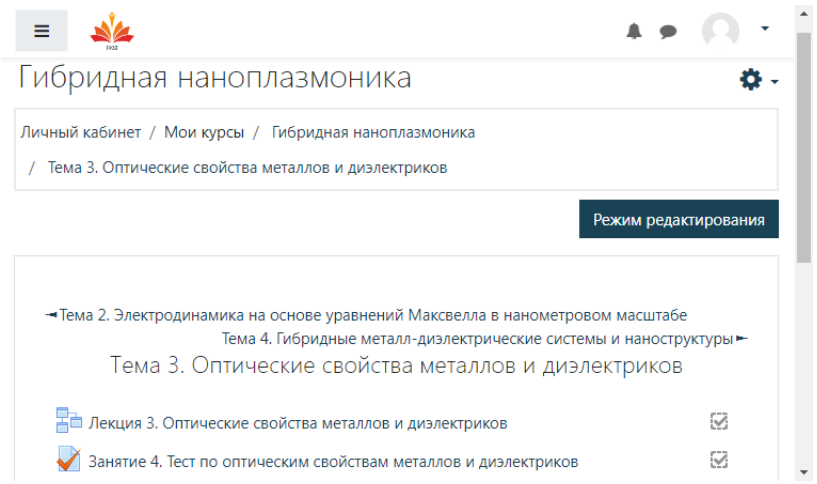


Рис. 8. Страница элементов третьей темы дистанционного курса по гибридной наноплазмонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

в форме семинара по фотонике и лазерам на основе гибридных лазерных структур. Двадцатое занятие проводится в форме теста по применению в сенсорике для моделирования плазмонных сенсоров. Двадцать первое занятие проводится в форме теста по нелинейным эффектам гибридной наноплазмоники. Двадцать второе занятие проводится в форме семинара по нелинейным эффектам гибридной наноплазмоники. Двадцать третье занятие проводится в форме второй контрольной работы. Двадцать четвёртое занятие проводится в форме теста по комбинированному использованию всех инструментов (Python+R+COMSOL) для моделирования структур гибридной наноплазмоники. Двадцать пятое занятие проводится в форме итоговой работы по гибридной наноплазмонике.

Процесс разработки дистанционного курса по гибридной наноплазмонике в системе управления обучением MOODLE продемонстрировал высокую эффективность интеграции теоретических знаний и практико-ориентированных компетенций, что особенно актуально для сложных междисциплинарных областей, таких как наномасштабная электродинамика и квантово-плазмонные системы. В результате курса слушатели получают не только глубокое понимание физических принципов и математических основ наноплазмоники, но и формируют навыки численного моделирования, что является ключевым требованием современных исследовательских проектов в области нанофотоники и сенсорики. Особое внимание к модульной структуре дистанционного курса позволило обеспечить логическую последовательность изучения тем, начиная с фундаментальных принципов уравнений Максвелла и оптических свойств материалов до специализированных разделов, таких как плазмон-фотонные кристаллы и квантово-механическое моделирование. Такой подход гарантировал не только постепенное усложнение материала, но и постепенное наращивание практических навыков, что особенно важно для слушателей с разным уровнем подготовки. Использование платформы MOODLE в качестве основы для дистанционного обучения оказалось оптимальным решением, так как она предоставляет удобные инструменты для организации интерактивных форм работы: от автоматической проверки тестовых заданий до обсуждений на форумах и совместного решения проектных задач. Это позволило снизить нагрузку на преподавателей при сохранении высокого уровня обратной связи с учениками, а также обеспечить гибкость в настройке учебного процесса под индивидуальные особенности слушателей.

Важнейшим результатом педагогического проектирования дистанционного курса стало внедрение практико-ориентированного подхода, где теоретические концепции сра-

зу же применяются в реальных задачах с использованием специализированного программного обеспечения, такого как COMSOL и Lumerical. Такой подход не только укрепил понимание ключевых принципов, но и развил у слушателей уверенность в использовании инструментов численного моделирования, что является критически важным для их дальнейшей профессиональной деятельности в научных и инженерных областях.

Одним из ключевых достижений стало успешное сочетание различных методологий оценки знаний: тестирования, практических работ, лабораторных заданий и проектных исследований. Это позволило получить объективную картину уровня подготовки слушателей, выявить слабые места в их знаниях и оперативно корректировать процесс обучения. Комплексный подход к оцениванию также способствовал повышению мотивации слушателей, так как они видели практическую значимость изучаемого материала и понимали, как их успехи могут быть применены на практике.

Ещё одним значимым итогом стало создание среды для коллективного обучения и взаимодействия, что особенно важно в дистанционном формате. Форумы, вебинары и групповые проекты не только улучшили вовлечённость слушателей, но и сформировали сообщество единомышленников, способствующее обмену опытом и поддержке в сложных вопросах. Такой формат обучения способствовал не только обмену знаниями, но и развитию коммуникативных навыков, которые необходимы для успешной работы в современных научных коллективах.

Пилотное тестирование курса выявило необходимость некоторых корректировок в уровне сложности практических заданий и уточнении временных рамок для выполнения проектов, что подтвердило важность этапа тестирования в процессе разработки образовательной программы. Обратная связь от участников пилотной группы позволила не только улучшить качество учебных материалов, но и оптимизировать структуру курса, сделав его более доступным для широкой аудитории.

Подготовка преподавателей к ведению дистанционного курса также стала одним из ключевых этапов, так как от их компетенций напрямую зависели качество проведения занятий и уровень вовлечённости слушателей. Обучение работе с платформой MOODLE и методами дистанционного обучения позволило преподавателям эффективнее взаимодействовать с учениками, оперативно отвечать на их вопросы и поддерживать мотивацию на протяжении всего курса.

Важно отметить, что разработка курса потребовала междисциплинарного подхода, объединившего физику, электронику, математическое моделирование и информационные технологии. Это подчеркнуло актуальность подобных программ для подготовки специалистов нового уровня, способных работать на стыке нескольких наук. В результате слушатели не только расширяют свои академические знания, но и приобретают гибкие компетенции, необходимые для решения сложных научно-технических задач.

Разработка учебно-методических материалов с акцентом на визуализацию и интерактивность позволила сделать сложные физические процессы более понятными для слушателей. Использование анимаций, графиков и практических симуляций повысило уровень усвоения материала и сделало обучение более интересным и эффективным, что является одним из ключевых факторов успеха дистанционного курса.

Моделирование гибридных наносистем с использованием подхода, включающего аналитические методы, численное моделирование и статистический анализ данных, позволило слушателям не только изучить современные инструменты, но и осознать их потенциал в решении актуальных задач нанотехнологий. Это подтвердило востребованность программы как для исследователей, так и для инженеров, работающих в области разработки наноэлектронных и оптоэлектронных устройств.

В целом, разработанный курс не только отвечает современным требованиям к подготовке специалистов в области наноплазмоники, но и демонстрирует возможности ди-

станционного обучения при правильной организации учебного процесса. Эффективное сочетание теории, практики и интерактивного взаимодействия делает его уникальным инструментом для профессионального роста и научного развития специалистов в этой перспективной области науки.

Заключение

Разработка дистанционного курса по гибридной наноплазмонике в университете является важным шагом в обеспечении доступности качественного образования в области фотоники и нанотехнологий. Полученные результаты свидетельствуют о несомненной пользе курса гибридной наноплазмоники для студентов университетов, обучающихся на педагогических специальностях физико-математического профиля подготовки. Дистанционное обучение гнаноплазмонике является эффективным и привлекательным для студентов университетов, что подтверждается высоким интересом к курсу гибридной наноплазмоники. Курс по гибридной наноплазмонике обладает рядом преимуществ перед другими формами обучения, такими как гибкость графика, доступность и возможность обучения в удобное время. Технологии дистанционного обучения позволяют успешно использовать их для достижения высоких результатов в изучении наноплазмоники.

Выводы по исследованию можно сформулировать следующим образом:

1. написанный обзор научных работ по гибридной наноплазмонике показал актуальность темы исследования и позволил определить структуру дистанционного курса гибридной наноплазмоники в университете,
2. разработан и внедрён в практику вузовского обучения дистанционный курс по гибридной наноплазмонике, имеющий модульную структуру и достаточное наполнение содержанием,
3. созданные интерактивные и мультимедийные материалы для дистанционного курса гибридной наноплазмоники способствуют лучшему пониманию студентами современных концепций наноплазмоники,
4. созданные задания и тесты позволяют проводить проверку знаний студентов по курсу гибридной наноплазмоники в условиях смешанного обучения или дистанционного обучения наноплазмонике.

Задачи работы решены полностью.

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

Список использованных источников

1. Michel Ann-Katrin U. Subwavelength hybrid plasmonic structures for nonlinear nanophotonics // Light: science and applications. — 2021. — Feb. — Vol. 10, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41377-021-00479-9.

2. Hybrid nanophotonics / S. I. Lepeshov [et al.] // Physics-Uspekhi. — 2019. — Feb. — Vol. 61, no. 11. — P. 1035–1050. — URL: http://dx.doi.org/10.3367/ufne.2017.12.038275.

3. Enhancing plasmonic-photonic hybrid cavity modes by coupling of individual plasmonic nanoparticles / Shuaidi Zhang [et al.] // The journal of physical chemistry C. — 2019. —

Sept. — Vol. 123, no. 39. — P. 24255–24262. — URL: http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b07027.

4. Metal/semiconductor hybrid nanostructures for plasmon-enhanced applications / Ruibin Jiang [et al.] // Advanced materials. — 2014. — Apr. — Vol. 26, no. 31. — P. 5274–5309. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/adma.201400203.

5. Kim Sanggon, Yan Ruoxue. Recent developments in photonic, plasmonic and hybrid nanowire waveguides // Journal of materials chemistry C. — 2018. — Vol. 6, no. 44. — P. 11795–11816. — URL: http://dx.doi.org/10.1039/c8tc02981d.

6. Nanoassembled plasmonic-photonic hybrid cavity for tailored light-matter coupling / Michael Barth [et al.] // Nano letters. — 2010. — Feb. — Vol. 10, no. 3. — P. 891–895. — URL: http://dx.doi.org/10.1021/nl903555u.

7. Hybrid photonic-plasmonic crystal nanocavities / Xiaodong Yang [et al.] // ACS Nano. — 2011. — Mar. — Vol. 5, no. 4. — P. 2831–2838. — URL: http://dx.doi.org/10.1021/nn1033482.

8. Linic Suljo, Chavez Steven, Elias Rachel. Flow and extraction of energy and charge carriers in hybrid plasmonic nanostructures // Nature materials. — 2021. — Jan. — Vol. 20, no. 7. — P. 916–924. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41563-020-00858-4.

Сведения об авторах:

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

E-mail: lera.zhyravleva73510@mail.ru

ORCID iD 0009-0008-1747-652X

Web of Science ResearcherID JRW-6156-2023

Original article
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Development of a distance learning course on hybrid nanoplasmonics

V. D. Odnakova

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432000, Ulyanovsk, Russia

Submitted July 1, 2026
Resubmitted July 3, 2026
Published September 30, 2026

Abstract. The results of the development of a distance learning course on hybrid nanoplasmonics in the learning management system MOODLE are presented. Hybrid nanoplasmonics is a cutting-edge interdisciplinary field situated at the intersection of nanophotonics, materials science, and quantum technologies. The aim of the study is to develop a distance learning course on hybrid nanoplasmonics that will contribute to improving students' knowledge of hybrid nanoplasmonics, the quality of education, and the development of university students' skills in the field of nanoplasmonics. Developing such a course within the Moodle learning management system is particularly relevant in the context of the digital transformation of education.

Keywords: course, distance learning course, nanoplasmonics, hybrid nanoplasmonics, photonics, nanophotonics, metallic nanostructure, graphene, plasmon resonance, nanostructure

References

1. Michel Ann-Katrin U. Subwavelength hybrid plasmonic structures for nonlinear nanophotonics // Light: science and applications. — 2021. — Feb. — Vol. 10, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41377-021-00479-9.

2. Enhancing plasmonic-photonic hybrid cavity modes by coupling of individual plasmonic nanoparticles / Shuaidi Zhang [et al.] // The journal of physical chemistry C. — 2019. — Sept. — Vol. 123, no. 39. — P. 24255–24262. — URL: http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b07027.

3. Hybrid nanophotonics / S. I. Lepeshov [et al.] // Physics-Uspekhi. — 2019. — Feb. — Vol. 61, no. 11. — P. 1035–1050. — URL: http://dx.doi.org/10.3367/ufne.2017.12.038275.

4. Kim Sanggon, Yan Ruoxue. Recent developments in photonic, plasmonic and hybrid nanowire waveguides // Journal of materials chemistry C. — 2018. — Vol. 6, no. 44. — P. 11795–11816. — URL: http://dx.doi.org/10.1039/c8tc02981d.

5. Nanoassembled plasmonic-photonic hybrid cavity for tailored light-matter coupling / Michael Barth [et al.] // Nano letters. — 2010. — Feb. — Vol. 10, no. 3. — P. 891–895. — URL: http://dx.doi.org/10.1021/nl903555u.

6. Hybrid photonic-plasmonic crystal nanocavities / Xiaodong Yang [et al.] // ACS Nano. — 2011. — Mar. — Vol. 5, no. 4. — P. 2831–2838. — URL: http://dx.doi.org/10.1021/nn1033482.

7. Metal/semiconductor hybrid nanostructures for plasmon-enhanced applications / Ruibin Jiang [et al.] // Advanced materials. — 2014. — Apr. — Vol. 26, no. 31. — P. 5274–5309. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/adma.201400203.

8. Linic Suljo, Chavez Steven, Elias Rachel. Flow and extraction of energy and charge carriers in hybrid plasmonic nanostructures // Nature materials. — 2021. — Jan. — Vol. 20, no. 7. — P. 916–924. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41563-020-00858-4.

Information about authors:

Valeriya Dmitrievna Odnakova — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ulyanovsk State Pedagogical University", Ulyanovsk, Russia.

E-mail: lera.zhyravleva73510@mail.ru

ORCID iD 0009-0008-1747-652X

Web of Science ResearcherID JRW-6156-2023

Научная статья
УДК 372.853
ББК 74.48
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Разработка дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем

З. А. Толянина [1]

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432000, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 23 июня 2026 года
После переработки 25 июня 2026 года
Опубликована 30 сентября 2026 года

Аннотация. Разработан структурированный дистанционный курс теоретической физики мезоскопических систем с использованием дистанционных технологий в системе управления обучением MOODLE. Курс по физике мезоскопических систем с фокусом на нанокристаллическую керамику предназначен для студентов старших курсов и аспирантов, специализирующихся в области физики конденсированного состояния, материаловедения и нанотехнологий. Целью курса является формирование у обучающихся понимания физических процессов в мезоскопических системах и особенностей применения нанокристаллической керамики в современных технологиях.

Ключевые слова: курс, дистанционный курс, теоретическая физика, мезоскопическая система, нанотехнологии, нанокристаллическая керамика

Введение

В последние годы мезоскопические системы, размеры которых находятся в промежуточном диапазоне между микроструктурами и наноструктурами (от нескольких нанометров до микрон), привлекают пристальное внимание исследователей благодаря уникальному сочетанию квантовых и классических свойств.

Целью исследования является образовательный процесс по теоретической физике в педагогическом университете. В соответствии с целью работы поставлена задача исследования, состоящая в том, чтобы разработать дистанционный курс физики мезоскопических систем.

Объектом исследования является процесс обучения теоретической физике мезоскопических систем с применением дистанционных образовательных технологий. Предметом исследования является система методологических и технологических аспектов разработки дистанционного курса теоретической физики мезоскопических систем.

[1]E-mail: ms.zinaida.tolyanina@yandex.ru

Методами исследования являются компьютерные методы разработки дистанционных курсов, анализ научной литературы по теоретической физике мезоскопических систем. Материалами исследования являются платформа для дистанционного обучения MOODLE, научные публикации по теоретической физике мезоскопических систем.

Научная новизна исследования заключается в том, что разработана авторская методика преподавания моделирования теоретической физики мезоскопических систем в дистанционном формате.

Гипотеза научного исследования, заключается в том, что дистанционный курс теоретической физики мезоскопических систем повысит доступность и качество обучения за счёт применения дистанционных технологий и практико-ориентированных методов обучения теоретической физике, подтверждена полностью.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что исследование расширяет методологическую базу дистанционного обучения в сфере теоретической физики мезоскопических систем, систематизирует подходы к моделированию физических процессов в мезоскопических системах и предлагает новые принципы организации образовательного процесса. Практическая значимость исследования заключается в том, что дистанционный курс теоретической физики мезоскопических систем может быть использован в вузах и научных центрах для подготовки специалистов в области физики.

Результаты разработки дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики

Физика мезоскопических систем представляет собой углублённый курс, предназначенный для студентов физических, инженерных и педагогических направлений подготовки, а также для аспирантов, работающих в области наноматериалов и функциональной керамики. Курс направлен на формирование комплексного понимания основных концепций мезоскопической физики, её связей с экспериментальными методами исследования и прикладными задачами в современной науке и технологиях. В рамках курса студенты не только изучают теоретические аспекты, но и получают навыки анализа научной литературы, работы с экспериментальными данными и решения прикладных задач, что позволяет интегрировать академические знания в реальные инженерные и научно-исследовательские процессы.

Процесс разработки дистанционного курса начинается с определения целевой аудитории и её предварительной подготовки, что включает анализ профессиональных компетенций, необходимых для освоения материала. На этом этапе формируются учебно-методические требования, которые должны соответствовать современным стандартам образования и отражать актуальные вызовы в области мезоскопической физики. Важно учесть базовые знания студентов по квантовой механике, статистической физике и материалам, чтобы обеспечить плавное вхождение в изучение специализированных тем.

Следующим шагом является детальная проработка тематического плана, который включает в себя как фундаментальные разделы, так и специализированные вопросы, связанные с нанокристаллической керамикой. Основное внимание уделяется логической последовательности изложения материала, начиная с введения в мезоскопическую физику и заканчивая современными тенденциями и прикладными аспектами. Такой подход позволяет студентам постепенно переходить от общего к частному, укрепляя теоретическую базу перед изучением конкретных методов синтеза, экспериментальных техник и прикладных применений.

Одним из ключевых направлений в разработке дистанционного курса является создание методического обеспечения, которое включает не только текстовые материалы, но и интерактивные элементы, такие как моделирование физических процессов и виртуальные лабораторные работы. Особое внимание уделяется разработке заданий, стимулирующих критическое мышление, например, анализ научных статей или решение задач на основе реальных экспериментальных данных. Это позволяет студентам не только усваивать теоретический материал, но и применять его на практике, что является важным для формирования аналитических навыков.

Важной составной частью курса является разработка системы оценивания, которая должна быть прозрачной, объективной и соответствовать принципам компетентностного подхода. В системе оценивания задействованы различные формы контроля, включая тесты, эссе, проектные работы и презентации, что позволяет комплексным образом оценивать уровень освоения материала. Кроме того, для поддержания мотивации студентов и вовлечения их в учебный процесс важно предусмотреть обратную связь от преподавателей, а также возможность обсуждения сложных вопросов в интерактивном режиме через форумы и вебинары.

Следующим этапом является внедрение технологий дистанционного обучения, обеспечивающих доступность материала и удобство его использования. В системе управления обучением MOODLE разрабатывается структурированное пространство курса, которое включает в себя тематические разделы, соответствующие каждой теме курса, а также дополнительные ресурсы, такие как видеолекции, электронные учебники, базы данных экспериментальных исследований и коллекции научных публикаций. Особое внимание уделяется адаптации материала для разных типов пользователей, включая студентов с ограниченными возможностями.

Одной из ключевых задач при разработке курса является обеспечение междисциплинарного подхода, который позволяет студентам видеть связи между различными аспектами мезоскопической физики и смежными областями науки, такими как микроэлектроника, нанотехнологии и материаловедение. Это способствует формированию целостного видения учебного материала и развитию творческого подхода к решению научных и практических задач.

Параллельно с теоретической частью разрабатывается практическая составляющая курса, которая включает в себя лабораторные работы в виртуальном формате, а также задания на самостоятельное изучение экспериментальных методов. Важно, чтобы студенты могли не только ознакомиться с теоретическими основами, но и применить их на практике, используя современное программное обеспечение для моделирования и анализа данных. Это позволяет подготовить специалистов, способных работать с реальными научными задачами в условиях современного лабораторного оборудования.

На этапе внедрения курса проводится тестирование его эффективности на контрольной группе студентов для выявления возможных пробелов и корректировки методических материалов. Оценка обратной связи от студентов и преподавателей позволяет внести необходимые изменения в структуру курса, улучшить качество презентации материала и повысить его доступность для разных категорий обучающихся. Этот этап также включает в себя подготовку методических рекомендаций для преподавателей, которые будут вести курс в дальнейшем.

Особое внимание уделяется вопросам интеллектуальной собственности и этики научных исследований. В рамках курса студенты знакомятся с основными принципами этичного поведения в науке, включая правила цитирования, соблюдения авторских прав и ответственного отношения к использованию научных данных. Это формирует у студентов культуру научной работы и способствует развитию академической честности.

Важным аспектом разработки дистанционного курса является интеграция современ-

ных научных тенденций и актуальных исследований в области мезоскопической физики и нанокерамики. Это позволяет студентам быть в курсе последних достижений науки и технологий, а также мотивирует их на самостоятельное изучение новейших разработок. Преподаватели курса регулярно обновляют учебные материалы, включая в них результаты последних исследований и актуальные примеры применения нанокерамики в различных областях.

Завершающим этапом разработки курса является обеспечение непрерывного совершенствования курса теоретической физики мезоскопических систем, что предполагает регулярную оценку его эффективности, анализ результатов обучения студентов и внесение необходимых изменений. Это позволяет поддерживать дистанционный курс на высоком уровне, соответствовать современным требованиям образования и отвечать потребностям как студентов, так и научного сообщества. Таким образом, курс по теоретической физике мезоскопических систем становится не только инструментом получения знаний, но и платформой для профессионального роста и научного творчества.

Обучение выстроено по принципу постепенного погружения: от фундаментальных понятий к практическому применению и перспективным исследованиям. Курс состоит из 9 логически связанных тем.

Первая тема дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению основных понятий мезоскопической физики. Вторая тема дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению структуры и свойств нанокристаллической керамики. Третья тема дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению методов синтеза нанокристаллической керамики. Четвёртая тема дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению экспериментальных методов исследования мезоскопических систем. Пятая тема дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению электрических свойств мезоскопических керамик. Шестая тема дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению тепловых и термоэлектрических свойств нанокристаллической керамики. Седьмая тема дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению оптических и магнитооптических явлений в мезоскопических системах. Восьмая тема дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению прикладных аспектов использования нанокристаллической керамики в микроэлектронике. Девятая тема дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению современных тенденций физики мезоскопических систем.

Первая тема закладывает теоретическую базу, включающую рассмотрение основных понятий мезоскопической физики, масштабов мезоскопических систем от 1 нм до 100 нм и их отличие от макроскопических и микроскопических объектов. Особое внимание уделяется квантовым эффектам, проявляющимся на этом уровне, и их влиянию на физические свойства материалов.

Во второй теме изучаются структура и свойства нанокристаллической керамики. Разбираются механизмы формирования нанокристаллов, роль границ зёрен и их влияние на механические, электрические и тепловые характеристики. Приводятся примеры распространённых керамических материалов с нанокристаллической структурой и их базовые параметры.

Третья тема посвящена методам синтеза нанокристаллической керамики. Подробно описываются такие технологии, как золь-гель процесс, механическое легирование, высокоэнергетическое измельчение и импульсное плазменное спекание. Для каждого метода анализируются преимущества, ограничения и возможности контроля размера зёрен.

Четвёртая тема дистанционного курса теоретической физики мезоскопических систем раскрывает экспериментальные методы исследования мезоскопических систем. Рассматриваются принципы работы просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, а также спектроскопических методов (рамановская спектроскопия, инфракрасная спектроскопия). Обучающиеся узнают, как с их помощью изучать структуру, состав и локальные свойства нанокристаллических материалов.

В пятой теме акцент смещается на электрические свойства мезоскопических керамик. Изучаются механизмы проводимости в условиях квантового ограничения, эффекты слабой локализации, кулоновская блокада и туннелирование. Обсуждаются зависимости проводимости от размера зёрен, температуры и внешних полей, а также модели переноса заряда в неоднородных средах.

Шестая тема дистанционного курса физики мезоскопических систем посвящена основным тепловым и термоэлектрическим свойствам нанокристаллической керамики. Анализируется влияние границ зёрен на теплопроводность, рассматриваются механизмы рассеяния фононов и способы управления теплопереносом. Разбираются перспективы использования таких материалов в термоэлектрических преобразователях энергии.

Седьмая тема охватывает некоторые оптические и магнитооптические явления в мезоскопических системах. Исследуются эффекты квантового ограничения на оптические спектры, плазмонные резонансы в наночастицах и магнитооптический эффект Фарадея в керамиках с ферромагнитными включениями. Приводятся примеры применения этих явлений в сенсорах и оптоэлектронных устройствах.

Восьмая тема фокусируется на прикладных физических аспектах. Рассматривается использование нанокристаллической керамики в микроэлектронике (диэлектрики, подложки), энергетике (твёрдооксидные топливные элементы, аккумуляторы), биомедицине (имплантаты) и катализе. Анализируются требования к материалам в каждом случае и пути оптимизации их свойств.

Завершающая девятая тема посвящена современным тенденциям и вызовам в области мезоскопических систем и нанокристаллической керамики. Обсуждаются достижения в области компьютерного моделирования (методы молекулярной динамики, теория функционала плотности), перспективы создания композитных материалов и гибридных структур. Отдельное внимание уделяется экологическим и экономическим аспектам масштабирования технологий.

Каждая тема включает лекционный материал, интерактивные задания для самопроверки, задания и список рекомендованной литературы. Для контроля усвоения предусмотрены промежуточные тесты и итоговый проект, предполагающий анализ конкретного применения нанокристаллической керамики с использованием изученных физических концепций. Такой подход обеспечивает глубокое понимание теоретической физики и готовит обучающихся к самостоятельной научной работе в данной области.

Логика построения курса следует от общего введения в мезоскопику и наноструктуру материала к последовательному анализу отдельных подсистем (фононной, электронной), затем к их взаимодействию в транспортных явлениях и, наконец, к комплексным свойствам и практическим применениям. Каждая тема физически обоснована, вытекает из предыдущей и подготавливает почву для последующей, формируя целостное представление о том, как мезоскопическая физика позволяет не только объяснить, но и целенаправленно конструировать свойства функциональных керамических материалов.

На основе анализа работ [1–9] показано, что курс теоретической физики мезоскопических систем обладает рядом преимуществ перед другими формами обучения, такими как гибкость графика, доступность и возможность обучения в удобное время. Дистанционный курс теоретической физики мезоскопических системе построен с использова-

нием модульной технологии построения курса, позволяющей эффективно управлять темпом продвижения по курсу. Разработанный дистанционный курс позволяет применять смешанную технологию преподавания теоретической физики в педагогическом университете. Технология дистанционного обучения становится всё более популярной и востребованной образовательной технологией в условиях непрерывного развития современных образовательных технологий. Технологии дистанционного обучения позволяют успешно использовать их для достижения высоких результатов в изучении курса теоретической физики мезоскопических систем. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых методик преподавания курса теоретической физики мезоскопических систем.

Результаты разработки материалов курса теоретической физики мезоскопических систем

Для педагогического проектирования дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем необходимо последовательно пройти этапы, каждый из которых логически вытекает из предыдущего и объединяется общей целью формирования компетентности в области мезоскопических систем и нанокерамики. Создание курса объёмом 108 часов требует комплексного подхода, объединяющего педагогическую, методическую, техническую и научно-исследовательскую составляющие.

Первым этапом является детальное изучение целевой аудитории — студентов физических, инженерных и педагогических специальностей, а также научных сотрудников, — с определением их первоначального уровня знаний в квантовой механике, статистической физике и материаловедении. На этом этапе необходимо разработать чёткое описание ожидаемых компетенций, включая теоретическое понимание мезоскопических явлений, умение анализировать научную литературу, применять экспериментальные методы и решать прикладные задачи. Без этого невозможно корректно спланировать глубину изложения материала и выбрать эффективные формы обучения.

Следующим шагом проектирования курса становится разработка концепции дистанционного курса, которая должна отражать его уникальность в контексте современного образования. Концепция подчёркивает междисциплинарный характер курса, связывая мезоскопическую физику с экспериментальными методами и прикладными задачами. На основе тематического плана необходимо определить логическую последовательность изучения тем, начиная с основ мезоскопической физики и заканчивая актуальными приложениями в микроэлектронике. Например, переход от теоретических основ к экспериментальным методам помогает студентам осознать взаимосвязь между моделированием и реальными исследованиями. Таким образом, формируется целостная образовательная траектория, обеспечивающая плавный переход от фундаментальных знаний к специализированным.

На основе концепции создаётся детализированная дидактическая структура, в которой распределяется время на изучение каждой из девяти тем в соответствии с их сложностью и значимостью для формирования компетенций. Например, введение в мезоскопическую физику и структуру нанокерамики требует больше часов, так как задаёт базовые представления, в то время как специализированные темы, такие как магнитооптические явления или прикладные аспекты, могут изучаться более компактно, но с углублённым анализом. При этом важно учитывать, что каждая тема должна содержать не только теоретический материал, но и практические задания для закрепления знаний.

Следующим ключевым этапом является разработка методического обеспечения, которое должно включать текстовые материалы, презентации, видеоуроки и интерактивные элементы. Особое внимание уделяется созданию модульного подхода, где каждая

тема представлена в виде отдельного блока, содержащего теоретическую часть, примеры решения задач, кейсы из научной литературы и задания для самостоятельной работы. Например, для темы «Методы синтеза нанокерамики» можно предусмотреть видео с демонстрацией лабораторных процедур или симуляцию процесса синтеза с использованием специализированного программного обеспечения. Это позволяет студентам не только усваивать информацию, но и применять её на практике.

Одним из инновационных аспектов курса является внедрение интерактивных элементов, которые стимулируют активное участие студентов в образовательном процессе. В рамках каждой темы разрабатываются виртуальные лабораторные работы, направленные на моделирование физических процессов. Например, для темы «Электрические свойства мезоскопических керамик» можно предложить задание по моделированию токопроводимости в нанокристаллической структуре с использованием специализированных программ. Такие практические занятия позволяют студентам применить теоретические знания и развить навыки анализа данных, что соответствует компетентностному подходу.

Система оценивания должна быть многоуровневой и включать в себя как традиционные формы контроля, такие как тесты и экзаменационные вопросы, так и проекты, презентации и эссе. Например, для оценки понимания прикладных аспектов нанокерамики студенты могут выполнять проект по анализу научной статьи с последующей презентацией результатов. Это позволяет не только объективно оценить уровень знаний, но и развить навыки критического мышления и публичного выступления. Важно, чтобы система оценивания была прозрачной и мотивирующей, обеспечивая обратную связь на каждом этапе обучения.

Поскольку курс теоретической физики мезоскопических систем реализуется в дистанционном формате, необходимо предусмотреть его адаптацию для работы в онлайн-среде. Это включает разработку структурированного пространства курса в платформе MOODLE или аналогичной системе, где каждый раздел тематически выделен и содержит все необходимые материалы. В курс должны быть включены видеолекции, интерактивные тесты, форумы для обсуждения сложных вопросов, а также архивы научных статей и экспериментальных данных. Особое внимание уделяется доступности материалов для студентов с ограниченными возможностями, например, через использование текстовых описаний для графиков и видео.

Доступность и вовлечённость студентов в учебный процесс во многом зависят от эффективных механизмов обратной связи. Преподаватели должны предоставлять регулярную обратную связь на выполненные задания, организовывать вебинары для обсуждения актуальных тем и создавать закрытые группы для обсуждения теоретических и практических вопросов. Например, после изучения темы «Экспериментальные методы исследования» можно провести вебинар, на котором обсуждаются типичные ошибки при обработке данных и способы их устранения. Это помогает студентам чувствовать поддержку и мотивацию на протяжении всего курса.

Для успешной реализации курса необходимо обеспечить педагогическую поддержку преподавателей, которые будут его вести. Это включает разработку методических рекомендаций, обучение работе с интерактивными инструментами и использованию технологий дистанционного обучения. Например, преподаватели должны получить навыки работы с системой управления обучением MOODLE, уметь создавать интерактивные тесты и оценивать проектные работы. Таким образом, обеспечивается высокое качество преподавания и успешное освоение курса студентами.

После разработки всех материалов курс проходит пилотное тестирование на контрольной группе студентов для выявления возможных пробелов и сложностей. На этом этапе анализируется эффективность методик, заданий и форм контроля. По итогам пи-

лотирования вносятся корректировки: совершенствуется структура курса, улучшается качество презентации материала и добавляются дополнительные ресурсы. Например, если виртуальные лабораторные работы вызывают затруднения, может быть разработано более подробное руководство или видеоинструкция. Этот этап позволяет оптимизировать курс перед массовым внедрением.

Одним из ключевых аспектов курса является его актуальность для современной науки и технологий. Преподаватели должны регулярно обновлять учебные материалы, включая в них результаты последних исследований в области мезоскопической физики и нанокерамики. Например, в рамках темы «Современные тенденции» студенты могут анализировать последние публикации в области термоэлектрических материалов или нанокерамики для микроэлектроники. Это поддерживает интерес студентов к курсу и формирует у них навыки самостоятельного поиска и оценки научной информации. Также важно создать условия для участия студентов в научных дискуссиях через форумы и вебинары с приглашёнными экспертами.

Завершающим этапом является разработка механизмов непрерывного мониторинга и обновления курса. Это включает регулярный анализ обратной связи от студентов и преподавателей, оценку результатов обучения и внесение изменений с учётом новых научных данных и технических возможностей. Например, после каждого учебного семестра может проводиться анкетирование студентов для выявления их удовлетворённости курсом и предложений по улучшению. Таким образом, курс остаётся востребованным и соответствует современным требованиям образования. Это позволяет не только поддерживать его на высоком уровне, но и обеспечивает его развитие как платформы для научного творчества и профессионального роста.

Первая лекция дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению основных понятий мезоскопической физики. Вторая лекция дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению структуры и свойств нанокристаллической керамики. Третья лекция дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению методов синтеза нанокристаллической керамики. Четвёртая лекция дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению экспериментальных методов исследования мезоскопических систем. Пятая лекция дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению электрических свойств мезоскопических керамик. Шестая лекция дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению тепловых и термоэлектрических свойств нанокристаллической керамики. Седьмая лекция дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению оптических и магнитооптических явлений в мезоскопических системах. Восьмая лекция дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению прикладных аспектов использования нанокристаллической керамики в микроэлектронике. Девятая лекция дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем посвящена изучению современных тенденций физики мезоскопических систем и нанокерамик.

На рис. 1 приведено изображение страницы тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

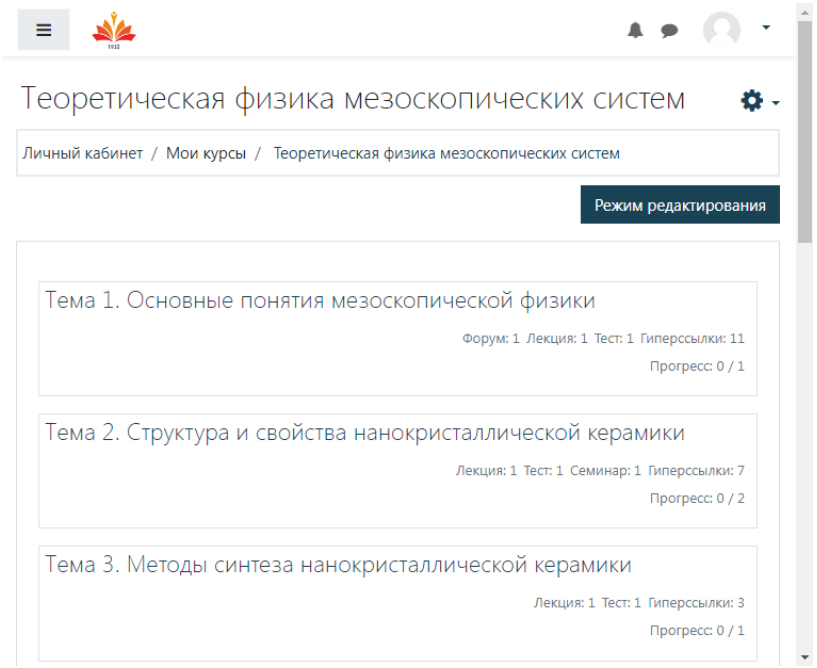


Рис. 1. Страница тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

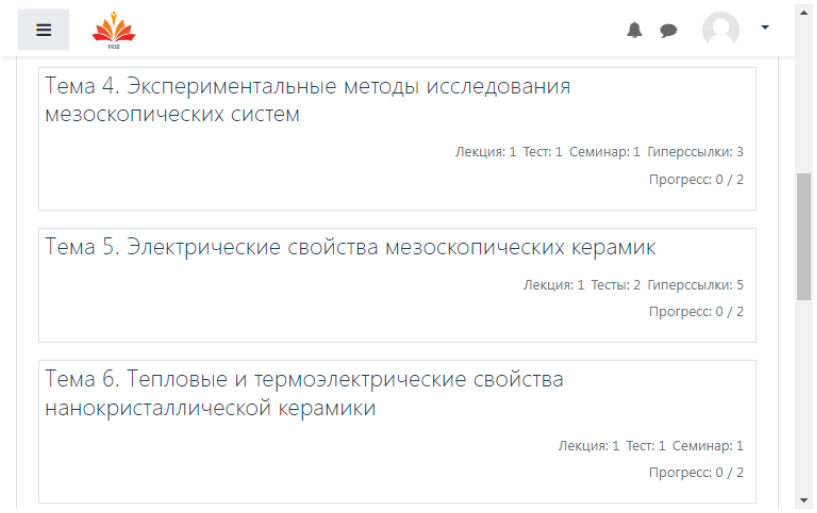


Рис. 2. Страница тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

На рис. 3 приведено изображение страницы тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение страницы элементов первой темы дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 5 приведено изображение страницы элементов второй темы дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

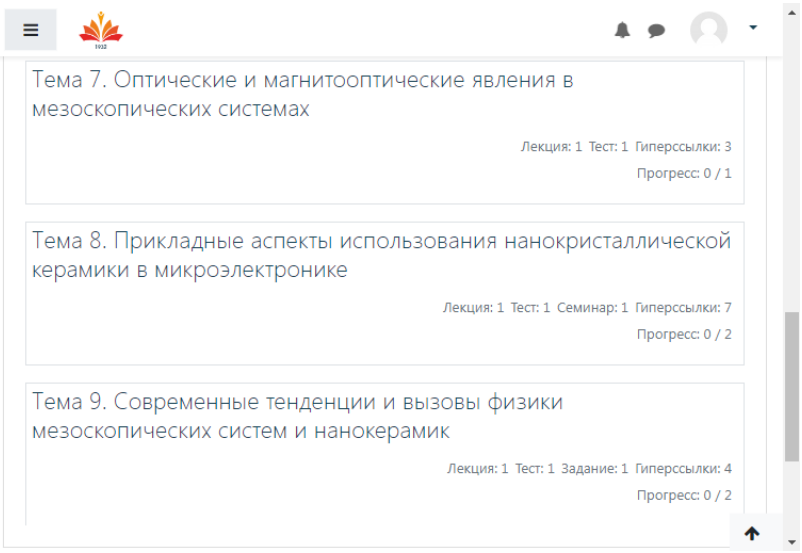


Рис. 3. Страница тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE



Рис. 4. Страница элементов первой темы дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

На рис. 6 приведено изображение страницы элементов третьей темы дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

Первое занятие планируется в форме теста по основным понятиям мезоскопической физики. Второе занятие планируется в форме теста по структуре и свойствам нанокристаллической керамики. Третье занятие планируется в форме семинара по структуре и свойствам нанокристаллической керамики. Четвёртое занятие планируется в форме теста по методам синтеза нанокристаллической керамики. Пятое занятие планируется в форме теста по экспериментальным методам исследования мезоскопических систем. Шестое занятие планируется в форме семинара по экспериментальным методам исследования мезоскопических систем. Седьмое занятие планируется в форме теста по электрическим свойствам мезоскопических керамик. Восьмое занятие планируется в форме

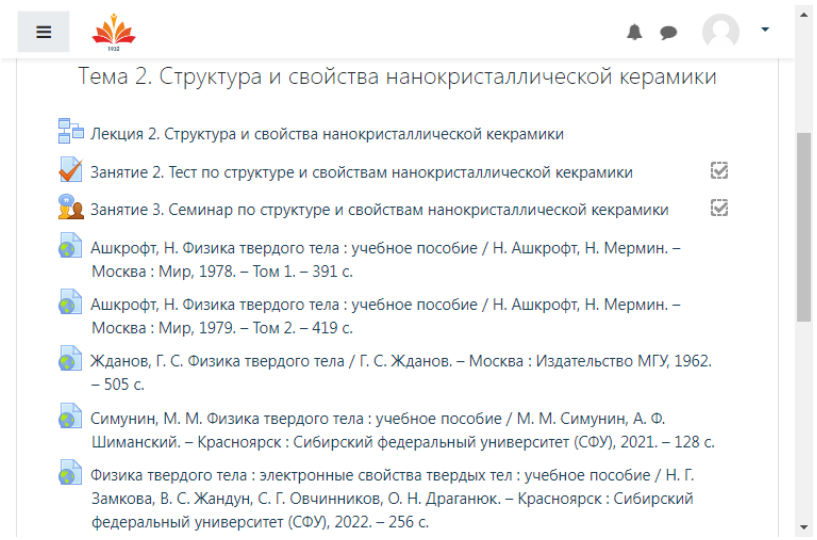


Рис. 5. Страница элементов второй темы дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

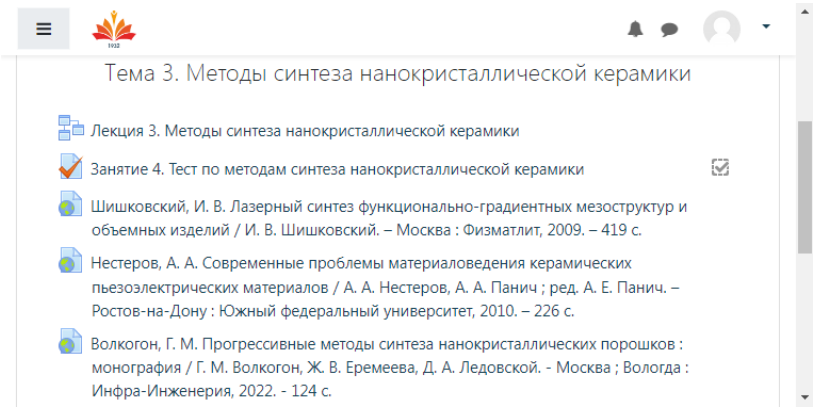


Рис. 6. Страница элементов третьей темы дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

контрольной работы. Девятое занятие планируется в форме теста по тепловым и термоэлектрическим свойствам нанокристаллической керамики. Десятое занятие планируется в форме семинара по тепловым и термоэлектрическим свойствам нанокристаллической керамики. Одиннадцатое занятие планируется в форме теста по оптическим и магнитооптическим явлениям в мезоскопических системах. Двенадцатое занятие планируется в форме теста по прикладным аспектам использования нанокристаллической керамики в микроэлектронике. Тринадцатое занятие планируется в форме семинара по прикладным аспектам использования нанокристаллической керамики в микроэлектронике. Четырнадцатое занятие планируется в форме теста по современным тенденциям и вызовам физики мезоскопических систем на основе нанокерамики. Пятнадцатое занятие планируется в форме итоговая работы по физике мезоскопических систем.

В процессе педагогического проектирования дистанционного курса теоретической физики мезоскопических систем в системе управления обучением MOODLE был сформирован комплексный подход, учитывающий как научно-методическую, так и технологическую составляющую современного образования. Разработанная структура курса на 108 академических часов (3 зачётные единицы) позволяет гармонично соединить фун-

даментальные знания с актуальными прикладными аспектами мезоскопической физики и нанокерамики, что соответствует требованиям компетентностного подхода.

Создание курса с нуля в системе управления обучением MOODLE потребовало не только точного распределения учебного времени по темам, но и тщательной проработки дидактической системы, способствующей активному усвоению учебного материала. Особое внимание уделялось последовательности изучения тем, начиная с основ мезоскопической физики и заканчивая специализированными прикладными вопросами, что обеспечивает логическую связность курса и формирует целостное понимание дисциплины у студентов.

Одним из ключевых аспектов стало создание модульной структуры, где каждая из девяти тем представлена в виде самостоятельного блока с чётко определённым соотношением теоретического материала, практических задач и лабораторных работ. Такой подход не только оптимизирует время на изучение каждой темы, но и позволяет студентам освоить материал, углубляясь в те аспекты, которые представляют наибольший интерес или актуальность для их будущей профессиональной деятельности.

Дистанционный формат обучения потребовал особой методической проработки для обеспечения доступности и интерактивности учебного процесса. Внедрение мультимедийных элементов, таких как видеолекции, интерактивные презентации и симуляции экспериментов, значительно повысило вовлечённость студентов, сделав абстрактные физические концепции более наглядными и понятными. Виртуальные лабораторные работы, интегрированные в курс, не только закрепляют теоретические знания, но и развивают практические навыки моделирования, что является неотъемлемой частью профессиональной подготовки в области мезоскопических систем.

Важным компонентом курса стала разработка многоуровневой системы оценивания, в которую включены не только традиционные формы контроля, такие как тесты и экзаменационные задания, но и творческие проекты, анализ научной литературы и презентации. Такой подход позволяет объективно оценить не только теоретическую подготовку студентов, но и их способность применять полученные знания на практике, а также развивает навыки критического мышления и научного дискурса.

Адаптация курса для работы в системе управления обучением MOODLE потребовала создания структурированного и пользовательского пространства, где каждый раздел содержит все необходимые материалы: текстовые учебники, видеолекции, интерактивные тесты и ссылки на актуальные научные публикации. Особое внимание уделялось доступности курса для студентов с различными образовательными потребностями, включая интеграцию альтернативных форматов представления информации для лиц с ограниченными возможностями.

Формирование обратной связи между преподавателями и студентами стало одним из приоритетных направлений в проектировании курса. Регулярные вебинары, обсуждения на форумах и индивидуальные консультации не только способствуют усвоению материала, но и создают условия для активного научного диалога, что особенно важно в междисциплинарной области мезоскопической физики. Интерактивный подход стимулирует студентов к самостоятельному поиску решений и углубленному изучению тем.

Профессиональная подготовка преподавателей, которые будут вести курс, оказалась не менее важной, чем разработка самого учебного контента. Методические рекомендации, обучение работе с инструментами MOODLE и внедрению интерактивных технологий обеспечили высокое качество преподавания и эффективное взаимодействие с учащимися. Это позволило создать условия для успешного освоения курса и формирования у студентов прочных компетенций в области мезоскопических систем.

Пилотное тестирование дистанционного курса по теоретической физике мезоскопических систем на контрольной группе студентов стало неотъемлемой частью его проек-

тирования, позволив выявить потенциальные сложности и скорректировать методическое и техническое обеспечение. По итогам пилотирования были внесены необходимые изменения, такие как уточнение формулировок, улучшение навигации в системе управления обучением MOODLE и добавление дополнительных ресурсов, что повысило качество курса перед его официальным запуском.

Заключение

В результате работы был создан дистанционный курс, стимулирующий самостоятельное мышление, научную активность и профессиональный рост студентов в области мезоскопической физики и нанокерамики. Инновационные методики, использованные в проектировании дистанционного курса, открывают новые возможности для дистанционного обучения и делают его не менее эффективным, чем очное, а в ряде аспектов даже более гибким и адаптированным под индивидуальные потребности студентов. Непрерывное совершенствование дистанционного курса через регулярный мониторинг обратной связи от студентов и преподавателей, а также внедрение новых технологий и методик, гарантирует его актуальность и соответствие современным требованиям образования. Такой подход обеспечивает не только высокий уровень подготовки выпускников, но и способствует развитию их исследовательских компетенций, что является стратегической задачей современного образования. Интеграция актуальных научных достижений в учебный процесс сделала курс не только образовательной платформой, но и центром научного дискурса. Регулярное обновление материалов с учетом последних исследований в области мезоскопической физики и нанокерамики способствует формированию у студентов понимания динамики развития науки и стимулирует их к участию в научных проектах и конференциях.

По результатам исследования можно сформулировать выводы:

1. анализ научных работ по мезоскопическим системам показал актуальность темы исследования,
2. разработанный дистанционный курс теоретической физики мезоскопических систем, построенный с использованием модульной технологии, готов к использованию в образовательном процессе педагогического университета и позволяет применять смешанную технологию в преподавании теоретической физики.

Курс теоретической физики мезоскопических систем построен с использованием модульной технологии построения курса, что позволяет эффективно управлять темпом продвижения по курсу теоретической физики мезоскопических систем и применять смешанную технологию в преподавании теоретической физики.

Гипотеза научного исследования, заключающаяся в том, что дистанционный курс теоретической физики мезоскопических систем повысит доступность и качество обучения за счёт применения дистанционных технологий и практико-ориентированных методов обучения теоретической физике, подтверждена полностью.

Задачи работы решены полностью.

Разработанный дистанционный курс теоретической физики мезоскопических систем готов к использованию в образовательном процессе педагогического университета с использованием дистанционных технологий в системе управления обучением MOODLE. Теоретические аспекты внесли вклад в методику дистанционного обучения теоретической физике. Курс может быть внедрён в образовательные программы вузов по педагогическим направлениям подготовки.

Список использованных источников

1. Алтунин К. К., Колесова Т. А. Разработка элементов дистанционного курса по физической наноэлектронике в системе управления обучением MOODLE // Наука online. — 2022. — № 1 (18). — С. 88–112. — URL: https://elibrary.ru/dutumg.

2. Алтунин К. К., Шленкина Е. А. Разработка информационной системы поддержки изучения темы по оптике метаматериалов в составе курса по нанооптике // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 75–88. — URL: https://elibrary.ru/pticsm.

3. Алтунин К. К., Лебедев А. А. Разработка дистанционного курса по нанофизике в системе управления обучением MOODLE // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 60–74. — URL: https://elibrary.ru/mpcxsb.

4. Алтунин К. К., Сорокина Е. О. Разработка материалов занятия по оптике нанокомпозитных материалов в курсе по оптике тонкослойных и наноструктурных покрытий // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 18–30. — URL: https://elibrary.ru/wgfhkb.

5. Алтунин К. К. Разработка компьютерного сопровождения изучения темы по спайзерам в курсе нанооптики // Наука online. — 2018. — № 4 (5). — С. 74–93. — URL: https://elibrary.ru/pvxfxn.

6. Алтунин К. К., Петрова Е. А. Разработка модульной структуры дистнционного курса «Оптика метаматериалов» в системе управления обучением MOODLE // Наука online. — 2019. — № 1 (6). — С. 50–70. — URL: https://elibrary.ru/pgpsft.

7. Алтунин К. К., Карташова А. А. Разработка электронного образовательного ресурса по солнечной энергетике // Наука online. — 2019. — № 2 (7). — С. 15–32. — URL: https://elibrary.ru/omnoyk.

8. Тимченко В. М. Проектирование дистанционного курса по физике мезоскопических систем // Наука online. — 2023. — № 4 (25). — С. 80–90. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/01/04252023-005.pdf.

9. Илюшкина Е. А. Разработка дистанционного курса по радиотехническим устройствам в школе // Наука online. — 2024. — № 4 (29). — С. 60–72. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/12/04292024-006.pdf.

Сведения об авторах:

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

E-mail: ms.zinaida.tolyanina@yandex.ru

ORCID iD 0000-0003-2937-3889

Web of Science ResearcherID HMV-0830-2023

Original article
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Development of a distance learning course on the theoretical physics of mesoscopic systems

Z. A. Tolyanina

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432000, Ulyanovsk, Russia

Submitted June 23, 2026
Resubmitted June 25, 2026
Published September 30, 2026

Abstract. A structured distance-learning course on the theoretical physics of mesoscopic systems has been developed using remote learning technologies within the Moodle learning management system. Focusing on nanocrystalline ceramics, the course is designed for senior undergraduate and graduate students specializing in condensed matter physics, materials science, and nanotechnology. The course aims to provide students with an understanding of the physical processes occurring in mesoscopic systems and the specific applications of nanocrystalline ceramics in modern technologies.

Keywords: course, distance learning course, theoretical physics, mesoscopic system, nanotechnology, nanocrystalline ceramics

References

1. Altunin K. K., Kolesova T. A. Development of elements for a distance learning course on physical nanoelectronics in the learning management system MOODLE // Nauka online. — 2022. — no. 1 (18). — P. 88–112. — URL: https://elibrary.ru/dutumg.

2. Altunin K. K., Shlenkina E. A. Development of an information system to support the study of metamaterial optics within a nano-optics course // Nauka online. — 2022. — no. 2 (19). — P. 75–88. — URL: https://elibrary.ru/pticsm.

3. Altunin K. K., Lebedev A. A. Development of a distance learning course on nanophysics in the learning management system MOODLE // Nauka online. — 2022. — no. 2 (19). — P. 60–74. — URL: https://elibrary.ru/mpcxsb.

4. Altunin K. K., Sorokina E. O. Development of lesson materials on the optics of nanocomposite materials for a course on the optics of thin-film and nanostructured coatings // Nauka online. — 2022. — no. 2 (19). — P. 18–30. — URL: https://elibrary.ru/wgfhkb.

5. Altunin K. K. Development of computer-based support for studying spasers within a nano-optics course // Nauka online. — 2018. — no. 4 (5). — P. 74–93. — URL: https://elibrary.ru/pvxfxn.

6. Altunin K. K., Petrova E. A. Development of a modular structure for the "Optics of metamaterials" distance learning course in the learning management system MOODLE // Nauka online. — 2019. — no. 1 (6). — P. 50–70. — URL: https://elibrary.ru/pgpsft.

7. Altunin K. K., Kartashova A. A. Development of an electronic educational resource on solar energy sector // Nauka online. — 2019. — no. 2 (7). — P. 15–32. — URL: https://elibrary.ru/omnoyk.

8. Timchenko V. M. Designing a remote course on the physics of mesoscopic systems // Nauka online. — 2023. — no. 4 (25). — P. 80–90. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/01/04252023-005.pdf.

9. Ilushkina E. A. Developing a remote course on radio engineering devices for schools // Nauka online. — 2024. — no. 4 (29). — P. 60–72. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/12/04292024-006.pdf.

Information about authors:

Zinaida Alekseevna Tolyanina — 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: ms.zinaida.tolyanina@yandex.ru

ORCID iD 0000-0003-2937-3889

Web of Science ResearcherID HMV-0830-2023

Научная статья
УДК 372.853
ББК 74.48
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Разработка дистанционного курса топологической фотоники

Э. А. Юсифова [1]

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432000, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 16 июля 2026 года
После переработки 17 июля 2026 года
Опубликована 30 сентября 2026 года

Аннотация. Представлены результаты разработки дистанционного курса топологической фотоники в системе управления обучением MOODLE. Целью работы является описание процесса разработки дистанционного курса топологической фотоники, который будет способствовать повышению уровня знаний студентов по фотонике, качества образования и развития навыков студентов университета в области нанооптики, фотоники и нанотехнологий. Дистанционный курс по топологической фотонике предназначен для студентов, аспирантов и специалистов, интересующихся передовыми направлениями современной оптики и фотоники, связанными с топологическими фазами материи. Курс сочетает теоретическое обоснование ключевых концепций, практическое применение численных методов и мультифизических моделей, а также анализ актуальных технологических решений в области топологической оптоэлектроники.

Ключевые слова: фотоника, нанооптика, оптика, топологическая фотоника, курс, дистанционный курс, цифровизация образования

Введение

Современные вызовы образования требуют интеграции инновационных подходов, таких как топологическая фотоника, являющаяся областью современных технологий, где актуальность дистанционного обучения с использованием систем управления обучением (например, система управления обучением MOODLE) обусловлена потребностью в подготовке специалистов в условиях ограниченного доступа к высокотехнологичному оборудованию и географической распределённости учебных заведений. Развитие образовательных технологий ставит перед вузами задачу быстрого обновления образовательных программ, а дистанционные курсы в системе управления обучением MOODLE становятся ключевым инструментом для стандартизации знаний, обеспечения интерактивности (например, через виртуальные лаборатории) и адаптации к потребностям

[1]E-mail: alyana.ysifova@mail.ru

работодателей в области фотонных систем с топологической защитой. Эффективность обучения в условиях цифровизации образования зависит от качества интеграции научного контента с интерактивными элементами (модули симуляции, тесты на понимание топологических инвариантов), что система управления обучением MOODLE позволяет реализовать через плагины и мультимедийные ресурсы — именно поэтому разработка такого курса актуальна для повышения заинтересованности студентов и снижения отсева в физико-технических дисциплинах.

Топологическая фотоника является междисциплинарной областью на стыке физики конденсированного состояния, оптики и квантовой теории, изучающая распространение света в системах с топологическими защищёнными состояниями (например, в фотонных кристаллах или волноводах с нетривиальной топологией). В отличие от традиционной фотоники, где световые волны чувствительны к дефектам и рассеянию, топологические фотонные структуры обеспечивают устойчивую передачу сигналов благодаря защищённым каналам, аналогичным эффектам Холла или топологической изоляции в электронике. Ключевые концепции включают топологические инварианты (например, число Черна, индекс Уайтхеда), которые классифицируют материалы и определяют их оптические свойства, а также бесщелевые состояния на границах или дефектах, которые являются критически важными для создания компактных лазеров, сенсоров и квантовых вычислительных элементов. Практические приложения охватывают низкопороговые лазеры, волоконно-оптические сети, биофотонику (например, микроскопию с высоким контрастом) и квантовые технологии, включая топологические фотонные квантовые компьютеры, что делает область перспективной для решения задач в телекоммуникациях, медицине и информационных технологиях. Развитие топологической фотоники тесно связано с физическим материаловедением (например, использованием метаматериалов, фотонных кристаллов) и нанофотоникой, открывая возможности для создания невидимости, суперколлимационных пучков и гибридных квантово-классических систем.

Целью работы является описание процесса разработки дистанционного курса топологической фотоники, который будет способствовать повышению уровня знаний студентов по фотонике, качества образования и развития навыков студентов университета в области нанооптики, фотоники и нанотехнологий.

В соответствии с целью работы поставлены следующие задачи исследования:

1. написать обзор научных работ по топологической фотонике,
2. разработать модульную структуру и содержание дистанционного курса по топологической фотонике,
3. создать материалы для дистанционного курса, способствующие лучшему пониманию студентами современных концепций топологической фотоники,
4. создать задания и тесты для проверки знаний студентов по курсу топологической фотоники.

Объектом исследования является курс топологической фотоники. Предметом исследования является процесс разработки дистанционного курса топологической фотоники в системе управления обучением MOODLE.

В качестве методов исследования используются следующие методы: анализ существующих научных материалов по топологической фотонике, анализ существующих дистанционных курсов по топологической фотонике и физическим дисциплинам с использованием методов сравнительного анализа и экспертной оценки, методы разработки модульной структуры и содержания дистанционного курса по топологической фотонике с использованием методов системного анализа и проектирования на основе современных технологий обучения фотонике, методы создания интерактивных и мультимедийных материалов с использованием методов компьютерной графики, анимации

и видео, методы тестирования и оценки эффективности разработанного дистанционного курса топологической фотоники. В качестве материалов исследования используются учебники и учебные пособия по оптике и топологической фотонике для университетов, учебно-методические материалы по топологической фотонике, методические рекомендации по разработке дистанционных курсов, примеры успешных дистанционных курсов по топологической фотонике и смежным физико-техническим дисциплинам, компьютерные программы и инструменты для создания интерактивных и мультимедийных материалов по топологической фотонике.

Научная новизна исследования заключается в создании нового дистанционного курса топологической фотоники, учитывающего современные тенденции и требования к образованию физико-математического профиля, а также в применении инновационных методов и технологий для разработки дистанционного курса по топологической фотонике.

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

Теоретическая значимость научного исследования заключается в систематизации и обобщении существующих подходов к разработке дистанционных курсов по топологической фотонике, а также в определении основных принципов и требований созданию дистанционных курсов по фотонике. Практическая значимость научного исследования состоит в возможности использования разработанного дистанционного курса топологической фотоники в образовательном процессе университетов, что позволит повысить качество образования по учебным дисциплинам в области физики и развить навыки студентов университетов.

Обзор литературы по топологической фотонике

Топологическая фотоника стала преобразующей парадигмой в современной оптике, обеспечивая надёжное управление светом благодаря топологически защищённым состояниям. Стремительная эволюция этой области за последнее десятилетие требует систематического обзора её ключевых теоретических основ, экспериментальных подтверждений и потенциальных приложений.

Топологические фотонные сенсоры стали прорывом в современной оптической сенсорике благодаря интеграции механизмов топологической защиты и локализации света, таких как топологические состояния, квазисвязанные состояния в континууме и плазмонные поляритоны Тамма. Эти устройства демонстрируют исключительную чувствительность и высокодобротные резонансы, что делает их идеальными для высокоточного мониторинга окружающей среды, биомедицинской диагностики и промышленных сенсорных приложений. В этом обзоре рассматриваются фундаментальные физические принципы и разнообразные архитектуры сенсоров, от датчиков показателя преломления и биосенсоров до газовых и тепловых сенсоров, с акцентом на их принципы работы и показатели производительности. В статье @auxrussian@auxenglish[1] также рассматриваются проблемы достижения сверхвысокой добротности в практических устройствах, ограничения многопараметрического зондирования и сложность проектирования. В статье [1] предлагается физически обоснованные решения для преодоления этих барьеров, такие как интеграция вейлевских полуметаллов, гетероструктур на основе графена и неэрмитовых фотонных систем. Это сравнительное исследование подчеркивает преобразующее влияние топологических фотонных сенсоров на достижение сверхчувствительного обнаружения в различных областях.

Датчики являются необходимыми устройствами первостепенной важности во многих областях применения, от мониторинга окружающей среды и биомедицинской диагностики до химического анализа [2–6]. Эти устройства воспринимают изменения в физической среде посредством взаимодействия со светом, что позволяет проводить точные измерения таких явлений, как интенсивность света, температура, давление и химический состав. Традиционные датчики, основанные на традиционных фотонных структурах, широко используются [7–15]. Тем не менее, чувствительность к дефектам, шумовые помехи и ограничения в производительности, возникающие на высоких уровнях точности, сдерживают их развитие в реальных условиях. Недавние достижения в области фотоники стимулировали значительные инновации в проектировании и функциональности датчиков, при этом интеграция топологической фотоники стала прорывом [16–30]. Основы топологической фотоники возникли в результате изучения топологических изоляторов в физике твердого тела [17, 20, 21, 31, 32]. Материалы топологических изоляторов характеризуются наличием изолирующих объемных мод и проводящих поверхностных состояний или мод, невосприимчивых к обратному рассеянию, даже при наличии примесей или дефектов [31].

Рассмотренная литература демонстрирует, что топологическая фотоника перешла от чисто теоретической концепции к зрелой экспериментальной области с чёткими прикладными путями. Ключевые достижения включают экспериментальную проверку фотонных топологических фаз, разработку надёжных лазеров и сенсоров, а также интеграцию с квантовыми излучателями. Для дистанционного курса эта литература обеспечивают прочную основу для лекций, моделирования и дискуссий. Анализ литературы показывает, что топологическая фотоника остаётся одной из наиболее динамично развивающихся областей современной физики конденсированного состояния и оптики. Однако существующие дистанционные образовательные курсы по этой тематике носят фрагментарный характер и требуют дополнительной структуризации.

Результаты разработки структуры дистанционного курса по топологической фотонике

Дистанционный курс по топологической фотонике предназначен для студентов, аспирантов и специалистов, интересующихся передовыми направлениями современной оптики и фотоники, связанными с топологическими фазами материи. Курс сочетает теоретическое обоснование ключевых концепций, практическое применение численных методов и мультифизических моделей, а также анализ актуальных технологических решений в области топологической оптоэлектроники. Общая трудоёмкость курса составляет 180 академических часов, что соответствует 5 зачётным единицам и распределяется равномерно по модулям для обеспечения глубокого и систематического усвоения материала.

Первая тема посвящена изучению основ топологической фотоники и волновой оптики. Вторая тема посвящена изучению топологических инвариантов в одномерных, двумерных и трёхмерных системах фотоники. Третья тема посвящена изучению симметрии и классификации топологических изоляторов света. Четвёртая тема посвящена изучению топологических фотонных кристаллов и решёток в фотонике. Пятая тема посвящена изучению краевых и поверхностных состояний в топологических фотонных системах. Шестая тема посвящена изучению топологических дефектов и домены в фотонике. Седьмая тема посвящена изучению нелинейной топологической фотоники. Восьмая тема посвящена изучению методов моделирования на языке программирования Python для топологических систем. Девятая тема посвящена изучению численных методов на основе метода конечных элементов во временной области и метода плоскостных волн для моделирования распространения света в топологических структурах. Десятая тема

посвящена изучению квантовомеханических подходов для описания топологии квантовых оптических систем. Одиннадцатая тема посвящена изучению мультифизического моделирования топологических систем с учётом потерь и рассеяния. Двенадцатая тема посвящена изучению топологических фотонных устройств. Тринадцатая тема посвящена изучению топологических лазеров и усилителей для применения в оптоэлектронике. Четырнадцатая тема посвящена изучению топологической сенсорики и метрологии. Пятнаядцатая тема посвящена изучению использования языков программирования и прикладных программ для моделирования в топологической фотонике.

Начальным этапом курса служит введение в топологическую фотонику, где обучающиеся знакомятся с историей возникновения и актуальными тенденциями этого научного направления. Особое внимание уделяется физическим основам волновой оптики, включая принципы распространения электромагнитных волн в линейных и нелинейных средах, что создаёт базовый фундамент для понимания последующих разделов. Таким образом, студенты получают необходимые знания о природе световых полей и взаимодействии света с материалами, что становится основой для анализа топологических эффектов.

Далее в дистанционном курсе подробно рассматриваются топологические инварианты, которые определяют устойчивость краевых состояний в одномерных, двумерных и трёхмерных фотонных системах. Эту тему дополняют вопросы симметрий и классификации топологических изоляторов света, где студенты изучают групповые теории, зонную теорию, позволяющие описывать топологические фазы в различных пространственных конфигурациях. Понимание этих концепций критически важно для проектирования устойчивых фотонных структур, способных сохранять свои свойства при наличии дефектов или внешних возмущений.

В последующих модулях курс переходит к изучению топологических фотонных кристаллов и решёток, где рассматриваются периодические структуры, обладающие уникальными транспортными свойствами света. Здесь большое внимание уделяется краевым и поверхностным состояниям, которые возникают в таких системах и обеспечивают локализованное распространение света вдоль границ. Эти состояния играют ключевую роль в разработке топологически защищённых волноводов и устройств обработки информации на основе света. Анализ топологических дефектов и доменов позволяет обучающимся оценивать влияние нарушений периодичности на функциональность фотонных систем и разрабатывать методы их компенсации или использования в практических приложениях.

Особое место в курсе занимают нелинейные эффекты в топологических фотонных структурах, которые расширяют возможности управления светом за счёт нелинейных оптических взаимодействий. Этот раздел готовит студентов к анализу современных исследований в области нелинейной топологической фотоники, включая генерацию солитонов, бистабильность и нелинейные краевые состояния. Подобные знания необходимы для разработки адаптивных оптических устройств с динамическим управлением параметрами.

Практическая часть курса включает изучение численных методов и программных инструментов для моделирования топологических систем. Студенты осваивают основы программирования на Python для решения задач фотоники, включая реализацию алгоритмов моделирования распространения света в топологических структурах. Затем рассматриваются более сложные методы, такие как метод конечных элементов во временной области и метод плоскостных волн, которые позволяют учитывать сложные граничные условия и дисперсионные эффекты. Эти навыки формируют основу для проведения самостоятельных исследований и разработки собственных моделей.

Квантовомеханические аспекты топологических систем представляют отдельный

блок курса, где студенты знакомятся с подходами, основанными на теории представлений, топологических инвариантах в контексте квантовой механики и взаимодействии света с квантовыми состояниями. Этот материал тесно связан с мультифизическим моделированием, где изучаются потери, рассеяние и другие факторы, влияющие на реальные оптические системы. Комплексное моделирование с использованием инструментов, таких как Python, R и COMSOL, позволяет обучающимся учитывать множество физических эффектов одновременно, что является необходимым условием для разработки современных оптоэлектронных устройств.

В завершающих модулях курса рассматриваются конкретные приложения топологической фотоники, такие как топологические лазеры и усилители, устройства для сенсорики и метрологии, а также комбинированные системы с использованием различных инструментов моделирования. Здесь студенты анализируют примеры реальных устройств, разрабатывают собственные проекты и учатся оценивать их перспективы. Особое внимание уделяется интеграции теоретических знаний и практических навыков для решения актуальных задач в области оптоэлектроники и квантовых технологий.

Таким образом, курс топологической фотоники обеспечивает комплексное понимание современных научных и инженерных аспектов этого динамично развивающегося направления. Структура курса построена так, чтобы студенты могли постепенно переходить от фундаментальных основ к передовым методам моделирования и практическому применению, что способствует формированию профессиональных компетенций для научной и инженерной деятельности в области фотоники и оптоэлектроники.

Результаты разработки материалов дистанционного курса по топологической фотонике

Первым этапом педагогического проектирования является чёткое определение целей и задач курса, а также его целевой аудитории. Дистанционный курс ориентирован на студентов старших курсов, аспирантов и молодых исследователей в области фотоники, оптико-электронных систем и теоретической физики, которые готовы изучать передовые направления топологической оптики. На этом этапе необходимо проанализировать уровень предварительной подготовки участников, включая знания в области волновой оптики, квантовых систем и численных методов, чтобы адаптировать сложность материала и подобрать соответствующие форматы обучения. Поскольку курс требует интеграции теоретических и практических знаний, необходимо убедиться, что у аудитории есть базовые навыки программирования и работы с математическим обеспечением, что позволит эффективно освоить инструменты моделирования.

Следующим шагом является сопоставление содержания курса с образовательными стандартами и профессиональными компетенциями, которые требуются в современной науке и инженерии. Топологическая фотоника является междисциплинарным направлением, поэтому необходимо выделить ключевые компетенции, такие как понимание топологических фаз в фотонных системах, умение применять численные методы для моделирования оптических структур и анализ экспериментальных данных. На этом этапе важно определить, какие конкретно знания и навыки будут сформированы у обучающихся: от базовых принципов топологической защиты до практического проектирования устройств. Это позволит сформулировать логику построения тем и модулей курса, обеспечивая постепенное усложнение материала и формирование комплексных компетенций.

После определения компетенций необходимо разработать тематический план курса с учётом педагогической последовательности и логики усвоения материала. Курс начинается с введения в топологическую фотонику и физических основ волновой оптики, что создаёт фундамент для понимания последующих тем. Постепенно вводятся более

сложные концепции, такие как топологические инварианты, симметрии и классификация фотонных систем, что позволяет студентам постепенно наращивать глубину знаний. Особое внимание уделяется практико-ориентированным модулям, где изучаются методы моделирования и мультифизическое проектирование, что готовит обучающихся к решению реальных задач. Такая структура обеспечивает постепенный переход от теории к практике, а также позволяет интегрировать знания из разных областей, таких как квантовая механика, нелинейная оптика и вычислительные методы.

Поскольку курс рассчитан на 180 академических часов, необходимо распределить учебное время таким образом, чтобы каждый модуль содержал как теоретическую, так и практическую части, обеспечивая сбалансированную нагрузку. Например, модули по топологическим инвариантам и фотонным кристаллам должны включать не только лекционный материал, но и задания для самостоятельного изучения, а также практические упражнения по моделированию. Важно также предусмотреть временные резервы для обсуждения сложных тем, консультаций и самостоятельной работы. Модульная структура позволяет обучающимся гибко планировать своё время, что особенно актуально для дистанционного формата, где студенты могут совмещать учебу с другими обязанностями. Кроме того, модули можно адаптировать под индивидуальные темпы освоения материала.

В дистанционном формате важно использовать разнообразные интерактивные элементы для поддержания мотивации и вовлечённости обучающихся. Это могут быть вебинары с экспертами отрасли, обсуждения в дискуссионных форумах, групповые проекты и индивидуальные задания с обратной связью. Особое внимание следует уделить практическим занятиям, где студенты будут применять теоретические знания на практике, например, моделируя распространение света в топологических структурах с помощью Python или COMSOL. Также полезно включать интерактивные задачники, где студенты могут самостоятельно решать задачи и проверять свои знания с помощью автоматизированных систем. Это не только повышает эффективность обучения, но и помогает выявить пробелы в знаниях на ранних стадиях.

На этом этапе необходимо разработать систему оценки, которая будет адекватно отражать уровень усвоения материала и формирование компетенций. Она должна включать не только традиционные формы контроля, такие как тесты и экзаменационные работы, но и более сложные задания, такие как разработка проектов по моделированию топологических устройств или написание рефератов по актуальным исследованиям в области топологической фотоники. Важно также предусмотреть промежуточные аттестации, которые позволят студентам оценивать свой прогресс и корректировать стратегию обучения. Для дистанционного формата удобно использовать автоматизированные платформы для проведения тестирования и оценки практических работ, что снижает нагрузку на преподавателей и обеспечивает объективность результатов.

Разработка учебно-методического обеспечения является одним из ключевых этапов проектирования курса. Необходимо подготовить подробные конспекты лекций, слайды для вебинаров, практическое руководство по выполнению лабораторных работ и заданий, а также список рекомендуемой литературы, включая основные научные статьи, учебники и ресурсы в открытом доступе. Особенно важно обеспечить доступ к специализированному программному обеспечению для моделирования, такому как Python, COMSOL или R, предоставив студентам инструкции по установке и настройке инструментов. Кроме того, полезно разработать шаблоны для оформления отчетов и презентаций, что поможет студентам структурировать свою работу и сэкономить время на форматирование.

Практическая часть курса должна быть тесно интегрирована с теоретическим материалом и включать выполнение лабораторных работ по моделированию топологических

систем. Например, студенты могут изучать метод конечных элементов во временной области (FDTD) и метод плоскостных волн при решении задач распространения света в фотонных кристаллах. Для этого необходимо разработать пошаговые инструкции, примеры кода на Python, а также задания с возрастающей сложностью, позволяющие студентам отработать навыки программирования и анализа данных. Важно также предусмотреть консультационную поддержку для помощи в решении технических проблем, возникающих при выполнении практических работ. Это поможет студентам не только закрепить теоретические знания, но и развить навыки самостоятельной работы с современными инструментами моделирования.

В дистанционном обучении особое значение имеет система сопровождения и поддержки студентов. Необходимо предусмотреть несколько каналов обратной связи, таких как форумы, чаты, электронная почта и личные консультации в виде вебинаров. Важно также создать сообщество обучающихся, где студенты могли бы делиться опытом, обсуждать сложные вопросы и совместными усилиями решать практические задачи. Кроме того, преподаватели должны быть готовы оперативно отвечать на вопросы и предоставлять индивидуальную помощь тем, кто испытывает трудности с освоением материала. Регулярные опросы и обратная связь от студентов помогут выявить проблемные моменты и своевременно скорректировать учебный процесс.

Перед официальным запуском курса целесообразно провести его пилотное тестирование с небольшой группой студентов или экспертов. Это позволит выявить потенциальные сложности в структуре курса, недостатки в методическом обеспечении и проблемы с технической реализацией. На основе результатов пилотного тестирования можно внести необходимые коррективы, такие как переработка некоторых лекций, уточнение заданий или доработка инструкций по выполнению практических работ. Также важно собрать обратную связь от участников пилотной группы и использовать её для окончательной оптимизации курса перед запуском в массовом режиме. Это поможет повысить качество обучения и удовлетворенность студентов.

После завершения проектирования и пилотного тестирования необходимо организовать официальный запуск курса. Это включает настройку платформы обучения (например, системы управления обучением MOODLE), загрузку всех необходимых материалов, настройку систем оценки и коммуникации. Важно также разработать график проведения занятий, включая вебинары, семинары и консультации, и информировать студентов о сроках выполнения заданий и промежуточных аттестаций. В процессе обучения необходимо обеспечивать постоянную поддержку как технического, так и методического характера, чтобы студенты могли сосредоточиться на изучении материала. Также полезно проводить промежуточные анализы успеваемости и корректировать учебный план в случае необходимости.

В завершении обучения важно провести анализ его результатов, оценив уровень усвоения материала студентами, эффективность использованных методов оценивания обучающихся. Это может быть сделано с помощью анкетирования, анализа выполненных заданий и итоговых аттестаций. На основе собранной информации можно определить сильные и слабые стороны курса, а также выработать рекомендации по его дальнейшему развитию. Возможно, потребуется обновление учебных материалов, добавление новых тем или внедрение современных цифровых инструментов. Также полезно рассмотреть возможность расширения курса или создания дополнительных модулей для углублённого изучения отдельных аспектов топологической фотоники, что позволит сделать его более гибким и адаптивным к потребностям современной науки.

Таким образом, педагогическое проектирование дистанционного курса топологической фотоники представляет собой комплексный процесс, включающий этапы от определения образовательных целей и структурирования материала до организации под-

держки обучающихся и анализа результатов. Этот подход позволяет создать курс, который будет не только информативно насыщенным, но и доступным, удобным для освоения и актуальным для современных потребностей науки и индустрии.

Первая лекция посвящена изучению основ топологической фотоники и волновой оптики. Вторая лекция посвящена изучению топологических инвариантов в одномерных, двумерных и трёхмерных системах фотоники. Третья лекция посвящена изучению симметрии и классификации топологических изоляторов света. Четвёртая лекция посвящена изучению топологических фотонных кристаллов и решёток в фотонике. Пятая лекция посвящена изучению краевых и поверхностных состояний в топологических фотонных системах. Шестая лекция посвящена изучению топологических дефектов и домены в фотонике. Седьмая лекция посвящена изучению нелинейной топологической фотоники. Восьмая лекция посвящена изучению методов моделирования на языке программирования Python для топологических систем. Девятая лекция посвящена изучению численных методов на основе метода конечных элементов во временной области и метода плоскостных волн для моделирования распространения света в топологических структурах. Десятая лекция посвящена изучению квантовомеханических подходов для описания топологии квантовых оптических систем. Одиннадцатая лекция посвящена изучению мультифизического моделирования топологических систем с учётом потерь и рассеяния. Двенадцатая лекция посвящена изучению топологических фотонных устройств. Тринадцатая лекция посвящена изучению топологических лазеров и усилителей для применения в оптоэлектронике. Четырнадцатая лекция посвящена изучению топологической сенсорики и метрологии. Пятнадцатая лекция посвящена изучению использования языков программирования и прикладных программ для моделирования в топологической фотонике.

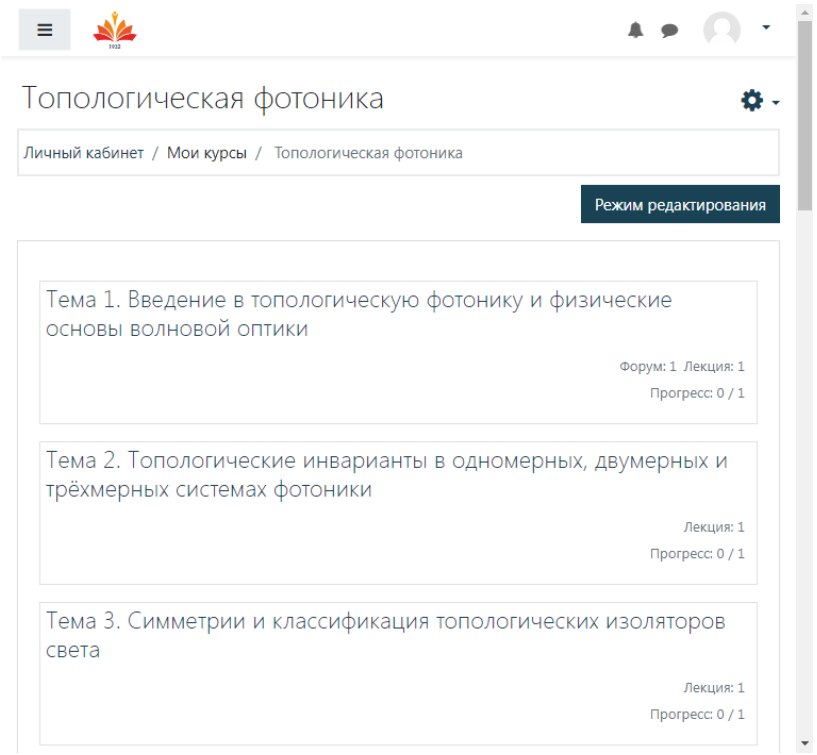


Рис. 1. Страница тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 1 приведено изображение страницы тематических модулей первой зачётной

единицы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

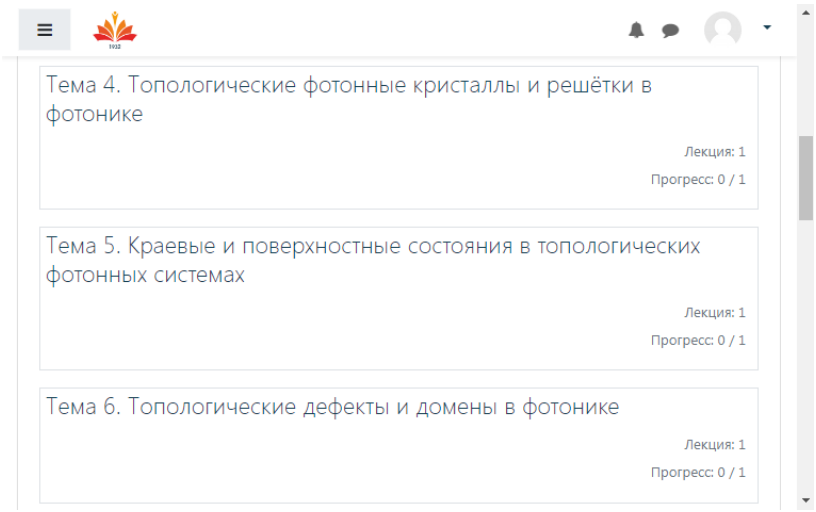


Рис. 2. Страница тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

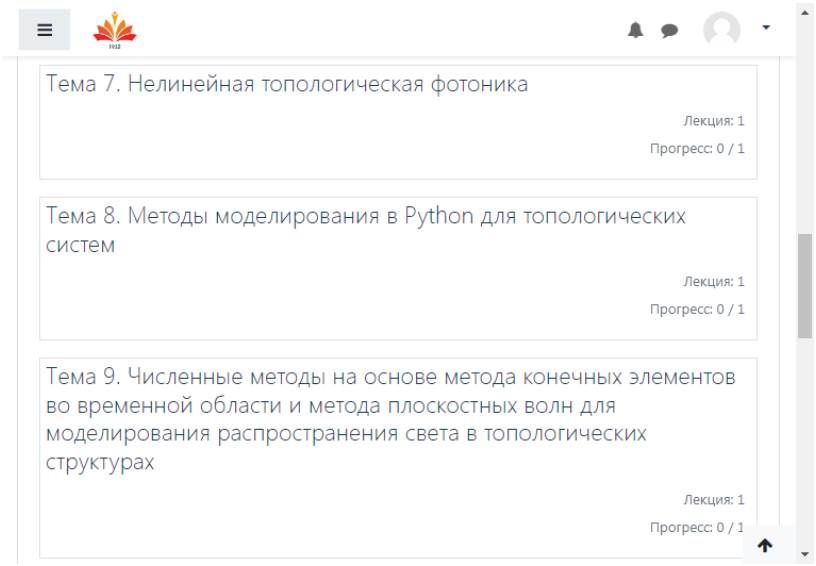


Рис. 3. Страница тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 приведено изображение страницы тематических модулей третьей зачётной единицы курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение страницы тематических модулей четвёртой зачётной единицы курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

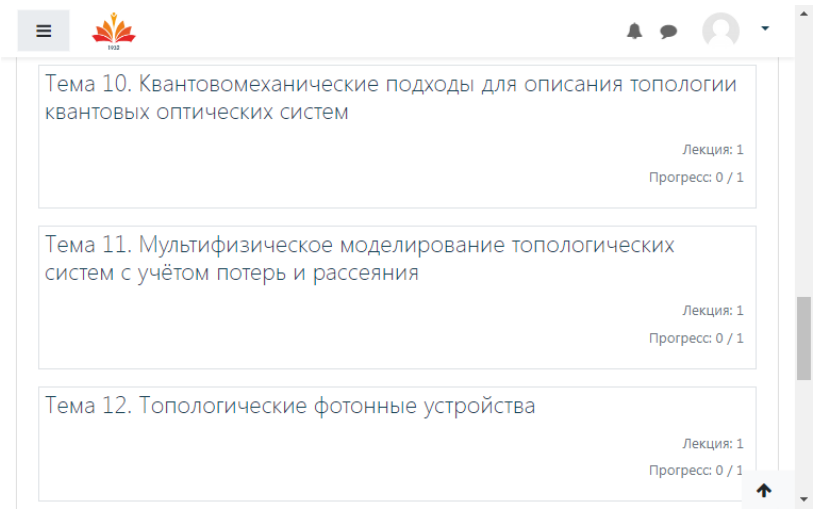


Рис. 4. Страница тематических модулей четвёртой зачётной единицы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

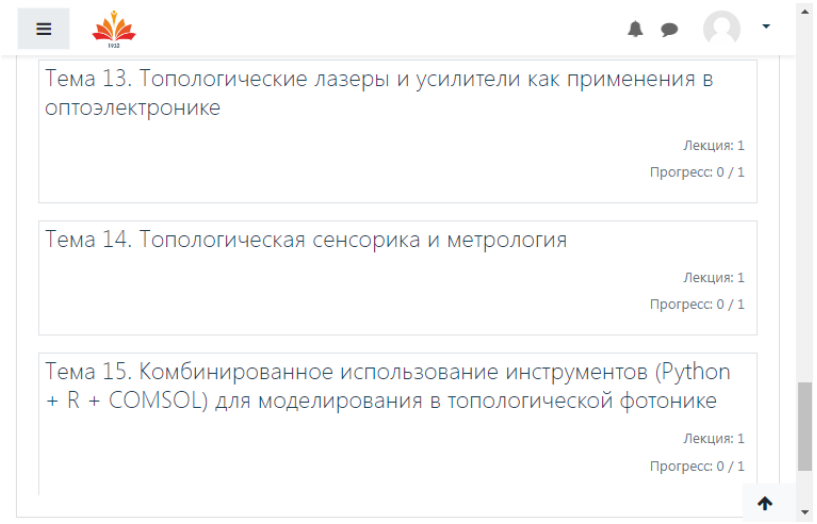


Рис. 5. Страница тематических модулей пятой зачётной единицы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 5 приведено изображение страницы тематических модулей пятой зачётной единицы курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 6 приведено изображение страницы элементов первой темы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

В процессе разработки и педагогического проектирования курса по топологической фотонике в системе MOODLE была сформирована комплексная образовательная структура, интегрирующая теоретические основы, современные инструменты моделирования и практико-ориентированные задачи, что позволило не только обеспечить глубинное освоение междисциплинарного материала, но и создать адаптивную и гибкую среду обучения для студентов и исследователей разного уровня подготовки.

Одним из ключевых выводов является высокий уровень междисциплинарности курса, который объединил физику конденсированного состояния, волновую оптику, кван-

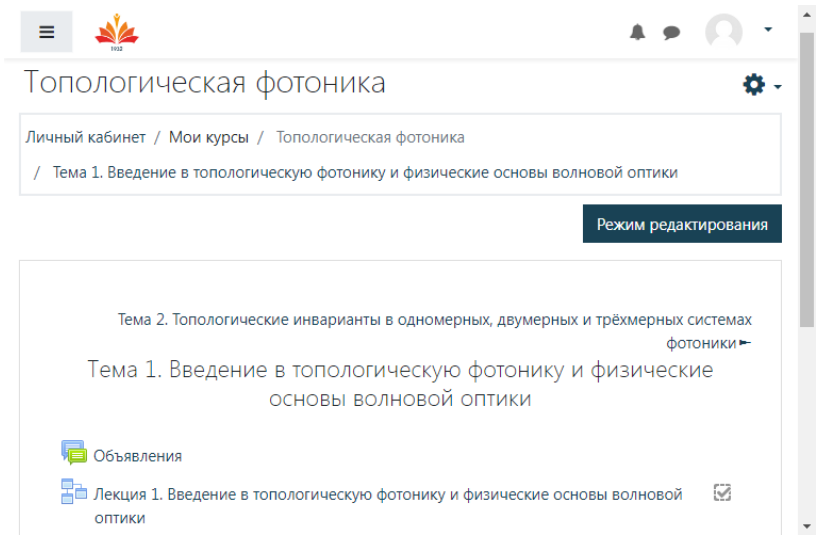


Рис. 6. Страница элементов первой темы дистанционного курса по топологической фотонике, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

товую оптику, численное моделирование и квантовую механику. Такая интеграция позволила студентам сформировать системное понимание топологических эффектов в фотонике, а не фрагментарные знания, что особенно важно для успешной работы в современных исследовательских коллективах и при разработке инновационных оптоэлектронных устройств.

Важной особенностью дистанционного курса топологической фотоники стало сбалансированное распределение учебной нагрузки, учитывающее как теоретическую, так и практическую составляющие. Тематика была структурирована таким образом, что каждая новая тема логично вытекала из предыдущей, начиная с вводных понятий волновой оптики и заканчивая актуальными приложениями топологической фотоники в сенсорике и оптоэлектронике. Этот подход обеспечивает постепенное наращивание сложности, что снижает риск перегрузки студентов и способствует более глубокому усвоению материала.

Особое внимание в процессе проектирования уделялось интерактивности и вовлечённости обучающихся, что стало возможным благодаря использованию интерактивных элементов в системе управления обучением MOODLE, таких как обсуждения в форумах, групповой анализ научных статей, а также выполнение практических заданий с обратной связью. Такой формат не только повысил мотивацию студентов, но и создал условия для активного взаимодействия как между обучающимися, так и между преподавателями и студентами, что особенно важно в дистанционном режиме.

Ещё одним значимым результатом стало внедрение современных инструментов моделирования на основе языков программирования Python и R, программного пакета COMSOL, что позволило студентам не только изучить теоретические концепции, но и применить их на практике. Практические занятия с использованием численных методов, таких как метод конечных элементов во временной области и метод плоскостных волн, обеспечили студентам возможность решать реальные задачи оптимизации фотонных структур, что приблизило учебный процесс к современным научным и инженерным практикам.

В ходе проектирования был также решен вопрос модульности и гибкости учебного процесса, что позволило студентам самостоятельно планировать время для изучения материала. Модульная структура курса даёт возможность адаптировать темпы обуче-

ния под индивидуальные особенности студентов, что особенно актуально для дистанционного формата. Кроме того, такая организация обучения позволяет вносить коррективы в учебный план на основе промежуточных оценок и обратной связи от студентов.

Особое внимание было уделено формированию компетенций в области мультифизического моделирования, что стало одним из инновационных аспектов курса. Комбинированное использование языка программирования Python для алгоритмического моделирования, языка программирования R для статистического анализа и программного пакета COMSOL для симуляций методом конечных элементов во временной области расширило горизонты студентов в области применения современных инструментов и подготовило их к работе в условиях, где требуется интеграция разных подходов для решения сложных задач.

Важно отметить, что в процессе разработки был проведён пилотный тест курса, который позволил выявить сильные и слабые стороны учебного материала, а также скорректировать формат подачи информации. Результаты пилотирования подтвердили эффективность выбранной структуры курса и показали, что студенты успешно осваивают как теоретические аспекты топологической фотоники, так и практические навыки моделирования.

Другой значимой особенностью курса стало создание практической ориентации, что проявилось в разработке тем, посвящённых реальным приложениям топологической фотоники, таким как топологические лазеры, сенсорика и усилители. Такое направление обучения не только расширило представление студентов о возможностях применения топологических структур, но и стимулировало развитие творческого мышления и способности к разработке инновационных решений.

Ещё одним важным моментом стало развитие навыков самостоятельной работы и критического мышления, что стало возможным благодаря использованию научных статей, обсуждению актуальных исследований в области топологической фотоники и выполнению заданий на анализ экспериментальных данных. Такие задачи способствуют не только углублению теоретических знаний, но и формированию умения оценивать научную информацию, формулировать гипотезы и разрабатывать экспериментальные планы.

Процесс проектирования курса также выявил необходимость постоянного обновления содержательной части в связи с быстрым развитием топологической фотоники. Это означает, что курс должен быть готов к динамическому внесению новых тем и методов, что позволит поддерживать актуальность учебного материала и соответствие современным научным тенденциям развития.

Наконец, важным итогом стало формирование профессионального сообщества вокруг курса, где студенты и преподаватели активно взаимодействуют, делятся опытом и поддерживают друг друга. Такой подход не только повышает эффективность обучения, но и способствует развитию научной коммуникации, что является важным фактором для будущих исследователей и инженеров.

Таким образом, курс по топологической фотонике в системе управления обучением MOODLE не только обеспечивает углублённое освоение теоретических и прикладных аспектов топологической оптики, но и создаёт условия для развития комплексных компетенций, необходимых для успешной научной и инженерной деятельности в современной фотонной индустрии. Этот опыт может быть использован как основа для дальнейшего развития дистанционных образовательных программ в области передовых технологий.

Заключение

Разработка дистанционного курса по топологической фотонике в университете является важным шагом в обеспечении доступности качественного образования в области оптики наноструктур, фотоники и нанотехнологий. Полученные результаты свидетельствуют о несомненной пользе курса топологической фотоники для студентов университетов, обучающихся на педагогических специальностях физико-математического профиля подготовки. Дистанционное обучение топологической фотонике является эффективным и привлекательным для студентов университетов, что подтверждается высоким интересом к курсу топологической фотоники. Курс топологической фотоники обладает рядом преимуществ перед другими формами обучения, такими как гибкость графика, доступность и возможность обучения в удобное время. Технология дистанционного обучения становится всё более популярной и востребованной образовательной технологией в условиях непрерывного развития современных образовательных технологий с учётом возможностей Интернета и видеоконференцсвязи. Технологии дистанционного обучения позволяют успешно использовать их для достижения высоких результатов в изучении топологической фотоники.

Выводы по исследованию можно сформулировать следующим образом:

1. написанный обзор научных работ по топологической фотонике показал актуальность темы исследования и позволил определить структуру дистанционного курса топологической фотоники в университете,
2. разработан и внедрён в практику вузовского обучения дистанционный курс по топологической фотонике, имеющий модульную структуру и достаточное наполнение содержанием,
3. созданные материалы для дистанционного курса топологической фотоники способствуют лучшему пониманию студентами современных концепций современной фотоники,
4. созданные задания и тесты позволяют проводить проверку знаний студентов по курсу топологической фотонике в условиях смешанного обучения или дистанционного обучения фотонике.

Задачи работы решены полностью.

Данное исследование имеет важное теоретическое значение, поскольку оно способствует развитию теории дистанционного обучения в области фотоники и нанотехнологий. Разработанный дистанционный курс топологической фотоники может быть использован в качестве основы для дальнейших исследований дистанционного обучения в области нанотехнологий. Теоретическая значимость исследования была реализована путём разработки дистанционного курса по топологической фотонике, который может быть использован в качестве основы для дальнейших исследований дистанционного обучения в области фотоники и нанотехнологий. Практическая значимость исследования была реализована путём создания эффективного дистанционного курса по топологической фотонике в системе управления обучением MOODLE, который будет способствовать повышению уровня знаний студентов по топологической фотонике и развитию навыков студентов университетов в области фотоники и нанотехнологий. Для обеспечения интерактивности обучения студентов на курсе топологической фотоники были задействованы современные образовательные технологии, такие как видеоуроки, интерактивные задания и тестирование знаний. Кроме того, была предусмотрена возможность консультаций с преподавателями курса и обратной связи для студентов.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если применять элементы дистанционного обучения в курсе топологической фотоники, то можно построить эффективную систему подготовки, которая будет эффективной и привлекательной для аудитории, а

дистанционный курс топологической фотоники имеет ряд преимуществ перед другими формами обучения, подтверждена полностью.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на улучшение дистанционного курса топологической фотоники путём внедрения новых интерактивных и мультимедийных материалов по топологической фотонике, а также на исследование эффективности дистанционного обучения в области фотоники и нанотехнологий. Дальнейшее развитие и совершенствование дистанционного курса топологической фотоники позволит не только расширить круг обучаемых, но и улучшить качество подготовки специалистов в области фотоники и нанотехнологий, что в перспективе способствует развитию современной фотоники.

Список использованных источников

1. Topological photonic crystal sensors: fundamental principles, recent advances, and emerging applications / Israa Abood [et al.] // Sensors. — 2025. — Feb. — Vol. 25, no. 5. — P. 1455. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/s25051455.

2. Recent advances in biomedical photonic sensors: a focus on optical-fibre-based sensing / Mario Ochoa [et al.] // Sensors. — 2021. — Sept. — Vol. 21, no. 19. — P. 6469. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/s21196469.

3. Topological sensor on a silicon chip / Abhishek Kumar [et al.] // Applied Physics Letters. — 2022. — July. — Vol. 121, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0097129.

4. Limonov Mikhail F. Fano resonance for applications // Advances in optics and photonics. — 2021. — Sept. — Vol. 13, no. 3. — P. 703. — URL: http://dx.doi.org/10.1364/AOP.420731.

5. Butt Muhammad Ali, Mateos Xavier, Piramidowicz Ryszard. Photonics sensors: a perspective on current advancements, emerging challenges, and potential solutions (Invited) // Physics Letters A. — 2024. — Aug. — Vol. 516. — P. 129633. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physleta.2024.129633.

6. Synthesis, characterization, and optical sensing of hydrophilic anodic alumina films / Alaa M. Abd-Elnaiem [et al.] // Optical materials. — 2024. — Nov. — Vol. 157. — P. 116390. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116390.

7. Nair Rajesh V., Vijaya R. Photonic crystal sensors: an overview // Progress in quantum electronics. — 2010. — May. — Vol. 34, no. 3. — P. 89–134. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.pquantelec.2010.01.001.

8. Zhang Ya-nan, Zhao Yong, Lv Ri-qing. A review for optical sensors based on photonic crystal cavities // Sensors and Actuators A: Physical. — 2015. — Sept. — Vol. 233. — P. 374–389. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.07.025.

9. Liu Y., Salemink H. W. M. Photonic crystal-based all-optical on-chip sensor // Optics express. — 2012. — Aug. — Vol. 20, no. 18. — P. 19912. — URL: http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.019912.

10. Elongated-hexagonal photonic crystal for buffering, sensing, and modulation / Sayed Elshahat [et al.] // Nanomaterials. — 2021. — Mar. — Vol. 11, no. 3. — P. 809. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/nano11030809.

11. Scullion Mark, Krauss Thomas, Di Falco Andrea. Slotted photonic crystal sensors // Sensors. — 2013. — Mar. — Vol. 13, no. 3. — P. 3675–3710. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/s130303675.

12. Abood Israa, Elshahat Sayed, Ouyang Zhengbiao. High figure of merit optical buffering in coupled-slot slab photonic crystal waveguide with ionic liquid // Nanomaterials. — 2020. — Sept. — Vol. 10, no. 9. — P. 1742. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/nano10091742.

13. Dispersion engineering of W2 steeple-house-defect waveguide photonic crystal / Sayed Elshahat [et al.] // Results in physics. — 2020. — Dec. — Vol. 19. — P. 103547. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103547.

14. Abood Israa, Elshahat Sayed, Ouyang Zhengbiao. High buffering capability of silicon-polymer photonic-crystal coupled cavity waveguide // Waves in random and complex media. — 2021. — Feb. — Vol. 33, no. 2. — P. 296–311. — URL: http://dx.doi.org/10.1080/17455030.2021.1879406.

15. Hou Jue, Li Mingzhu, Song Yanlin. Recent advances in colloidal photonic crystal sensors: materials, structures and analysis methods // Nano today. — 2018. — Oct. — Vol. 22. — P. 132–144. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.nantod.2018.08.008.

16. Jalali Mehrabad Mahmoud, Mittal Sunil, Hafezi Mohammad. Topological photonics: fundamental concepts, recent developments, and future directions // Physical Review A. — 2023. — Oct. — Vol. 108, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.108.040101.

17. Khanikaev Alexander B., Shvets Gennady. Two-dimensional topological photonics // Nature Photonics. — 2017. — Nov. — Vol. 11, no. 12. — P. 763–773. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41566-017-0048-5.

18. Slow light topological photonics with counter-propagating waves and its active control on a chip / Abhishek Kumar [et al.] // Nature communications. — 2024. — Jan. — Vol. 15, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41467-024-45175-5.

19. A brief review of topological photonics in one, two, and three dimensions / Zhihao Lan [et al.] // Reviews in physics. — 2022. — Dec. — Vol. 9. — P. 100076. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.revip.2022.100076.

20. On-chip topological nanophotonic devices / Cui-Cui Lu [et al.] // Chip. — 2022. — Dec. — Vol. 1, no. 4. — P. 100025. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.chip.2022.100025.

21. Pleasants Simon. Light needles in colloids // Nature photonics. — 2014. — Jan. — Vol. 8, no. 2. — P. 85–85. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2014.24.

22. Active topological photonics / Yasutomo Ota [et al.] // Nanophotonics. — 2020. — Jan. — Vol. 9, no. 3. — P. 547–567. — URL: http://dx.doi.org/10.1515/nanoph-2019-0376.

23. Topological photonics / Tomoki Ozawa [et al.] // Reviews of Modern Physics. — 2019. — Mar. — Vol. 91, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.91.015006.

24. Non-Hermitian and topological photonics: optics at an exceptional point / Midya Parto [et al.] // Nanophotonics. — 2020. — Oct. — Vol. 10, no. 1. — P. 403–423. — URL: http://dx.doi.org/10.1515/nanoph-2020-0434.

25. Roadmap on topological photonics / Hannah Price [et al.] // Journal of physics: photonics. — 2022. — June. — Vol. 4, no. 3. — P. 032501. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/2515-7647/ac4ee4.

26. The perspective of topological photonics for on-chip terahertz modulation and sensing / Yiwen Sun [et al.] // APL Photonics. — 2023. — Nov. — Vol. 8, no. 11. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0170233.

27. Hybrid topological photonic crystals / Yanan Wang [et al.] // Nature Communications. — 2023. — July. — Vol. 14, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41467-023-40172-6.

28. Applications of topological photonics in integrated photonic devices / You Wu [et al.] // Advanced Optical Materials. — 2017. — Aug. — Vol. 5, no. 18. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/adom.201700357.

29. Terahertz topological photonics for on-chip communication / Yihao Yang [et al.] // Nature Photonics. — 2020. — Apr. — Vol. 14, no. 7. — P. 446–451. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41566-020-0618-9.

30. Observation of gapless corner modes of photonic crystal slabs in synthetic translation dimensions / Wen-Jin Zhang [et al.] // Photonics Research. — 2024. — Feb. — Vol. 12, no. 3. — P. 444. — URL: http://dx.doi.org/10.1364/PRJ.506167.

31. Photonic topological insulators / Alexander B. Khanikaev [et al.] // Nature Materials. — 2012. — Dec. — Vol. 12, no. 3. — P. 233–239. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nmat3520.

32. Topological photonic crystals: a review / Hongfei Wang [et al.] // Frontiers of Optoelectronics. — 2020. — Jan. — Vol. 13, no. 1. — P. 50–72. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s12200-019-0949-7.

Сведения об авторах:

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

E-mail: alyana.ysifova@mail.ru

ORCID iD 0009-0005-6536-2082

Web of Science ResearcherID JRW-6185-2023

Original article
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Development of a distance learning course on topological photonics

E. A. Yusifova

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432000, Ulyanovsk, Russia

Submitted July 16, 2026
Resubmitted July 17, 2026
Published September 30, 2026

Abstract. The results of the development of a distance learning course on topological photonics in the learning management system MOODLE are presented. The objective is to describe the development process of a course designed to enhance students' knowledge of photonics and improve the quality of education, while fostering skills in nano-optics, photonics, and nanotechnology. The course targets undergraduate and graduate students, as well as professionals interested in cutting-edge areas of modern optics and photonics related to topological phases of matter. It combines the theoretical foundations of key concepts with the practical application of numerical methods and multiphysics models, alongside an analysis of current technological solutions in the field of topological optoelectronics.

Keywords: photonics, nano-optics, optics, topological photonics, course, distance learning course, digitalization of education

References

1. Topological photonic crystal sensors: fundamental principles, recent advances, and emerging applications / Israa Abood [et al.] // Sensors. — 2025. — Feb. — Vol. 25, no. 5. — P. 1455. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/s25051455.

2. Recent advances in biomedical photonic sensors: a focus on optical-fibre-based sensing / Mario Ochoa [et al.] // Sensors. — 2021. — Sept. — Vol. 21, no. 19. — P. 6469. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/s21196469.

3. Topological sensor on a silicon chip / Abhishek Kumar [et al.] // Applied Physics Letters. — 2022. — July. — Vol. 121, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0097129.

4. Limonov Mikhail F. Fano resonance for applications // Advances in optics and photonics. — 2021. — Sept. — Vol. 13, no. 3. — P. 703. — URL: http://dx.doi.org/10.1364/AOP.420731.

5. Butt Muhammad Ali, Mateos Xavier, Piramidowicz Ryszard. Photonics sensors: a perspective on current advancements, emerging challenges, and potential solutions (Invited) // Physics Letters A. — 2024. — Aug. — Vol. 516. — P. 129633. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physleta.2024.129633.

6. Synthesis, characterization, and optical sensing of hydrophilic anodic alumina films / Alaa M. Abd-Elnaiem [et al.] // Optical materials. — 2024. — Nov. — Vol. 157. — P. 116390. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116390.

7. Nair Rajesh V., Vijaya R. Photonic crystal sensors: an overview // Progress in quantum electronics. — 2010. — May. — Vol. 34, no. 3. — P. 89–134. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.pquantelec.2010.01.001.

8. Zhang Ya-nan, Zhao Yong, Lv Ri-qing. A review for optical sensors based on photonic crystal cavities // Sensors and Actuators A: Physical. — 2015. — Sept. — Vol. 233. — P. 374–389. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.07.025.

9. Liu Y., Salemink H. W. M. Photonic crystal-based all-optical on-chip sensor // Optics express. — 2012. — Aug. — Vol. 20, no. 18. — P. 19912. — URL: http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.019912.

10. Elongated-hexagonal photonic crystal for buffering, sensing, and modulation / Sayed Elshahat [et al.] // Nanomaterials. — 2021. — Mar. — Vol. 11, no. 3. — P. 809. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/nano11030809.

11. Scullion Mark, Krauss Thomas, Di Falco Andrea. Slotted photonic crystal sensors // Sensors. — 2013. — Mar. — Vol. 13, no. 3. — P. 3675–3710. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/s130303675.

12. Abood Israa, Elshahat Sayed, Ouyang Zhengbiao. High figure of merit optical buffering in coupled-slot slab photonic crystal waveguide with ionic liquid // Nanomaterials. — 2020. — Sept. — Vol. 10, no. 9. — P. 1742. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/nano10091742.

13. Dispersion engineering of W2 steeple-house-defect waveguide photonic crystal / Sayed Elshahat [et al.] // Results in physics. — 2020. — Dec. — Vol. 19. — P. 103547. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103547.

14. Abood Israa, Elshahat Sayed, Ouyang Zhengbiao. High buffering capability of silicon-polymer photonic-crystal coupled cavity waveguide // Waves in random and complex media. — 2021. — Feb. — Vol. 33, no. 2. — P. 296–311. — URL: http://dx.doi.org/10.1080/17455030.2021.1879406.

15. Hou Jue, Li Mingzhu, Song Yanlin. Recent advances in colloidal photonic crystal sensors: materials, structures and analysis methods // Nano today. — 2018. — Oct. — Vol. 22. — P. 132–144. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.nantod.2018.08.008.

16. Jalali Mehrabad Mahmoud, Mittal Sunil, Hafezi Mohammad. Topological photonics: fundamental concepts, recent developments, and future directions // Physical Review A. — 2023. — Oct. — Vol. 108, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.108.040101.

17. Khanikaev Alexander B., Shvets Gennady. Two-dimensional topological photonics // Nature Photonics. — 2017. — Nov. — Vol. 11, no. 12. — P. 763–773. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41566-017-0048-5.

18. Slow light topological photonics with counter-propagating waves and its active control on a chip / Abhishek Kumar [et al.] // Nature communications. — 2024. — Jan. — Vol. 15, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41467-024-45175-5.

19. A brief review of topological photonics in one, two, and three dimensions / Zhihao Lan [et al.] // Reviews in physics. — 2022. — Dec. — Vol. 9. — P. 100076. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.revip.2022.100076.

20. On-chip topological nanophotonic devices / Cui-Cui Lu [et al.] // Chip. — 2022. — Dec. — Vol. 1, no. 4. — P. 100025. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.chip.2022.100025.

21. Pleasants Simon. Light needles in colloids // Nature photonics. — 2014. — Jan. — Vol. 8, no. 2. — P. 85–85. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2014.24.

22. Active topological photonics / Yasutomo Ota [et al.] // Nanophotonics. — 2020. — Jan. — Vol. 9, no. 3. — P. 547–567. — URL: http://dx.doi.org/10.1515/nanoph-2019-0376.

23. Topological photonics / Tomoki Ozawa [et al.] // Reviews of Modern Physics. — 2019. — Mar. — Vol. 91, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.91.015006.

24. Non-Hermitian and topological photonics: optics at an exceptional point / Midya Parto [et al.] // Nanophotonics. — 2020. — Oct. — Vol. 10, no. 1. — P. 403–423. — URL: http://dx.doi.org/10.1515/nanoph-2020-0434.

25. Roadmap on topological photonics / Hannah Price [et al.] // Journal of physics: photonics. — 2022. — June. — Vol. 4, no. 3. — P. 032501. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/2515-7647/ac4ee4.

26. The perspective of topological photonics for on-chip terahertz modulation and sensing / Yiwen Sun [et al.] // APL Photonics. — 2023. — Nov. — Vol. 8, no. 11. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0170233.

27. Hybrid topological photonic crystals / Yanan Wang [et al.] // Nature Communications. — 2023. — July. — Vol. 14, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41467-023-40172-6.

28. Applications of topological photonics in integrated photonic devices / You Wu [et al.] // Advanced Optical Materials. — 2017. — Aug. — Vol. 5, no. 18. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/adom.201700357.

29. Terahertz topological photonics for on-chip communication / Yihao Yang [et al.] // Nature Photonics. — 2020. — Apr. — Vol. 14, no. 7. — P. 446–451. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41566-020-0618-9.

30. Observation of gapless corner modes of photonic crystal slabs in synthetic translation dimensions / Wen-Jin Zhang [et al.] // Photonics Research. — 2024. — Feb. — Vol. 12, no. 3. — P. 444. — URL: http://dx.doi.org/10.1364/PRJ.506167.

31. Photonic topological insulators / Alexander B. Khanikaev [et al.] // Nature Materials. — 2012. — Dec. — Vol. 12, no. 3. — P. 233–239. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nmat3520.

32. Topological photonic crystals: a review / Hongfei Wang [et al.] // Frontiers of Optoelectronics. — 2020. — Jan. — Vol. 13, no. 1. — P. 50–72. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s12200-019-0949-7.

Information about authors:

Elyana Akifovna Yusifova — 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: alyana.ysifova@mail.ru

ORCID iD 0009-0005-6536-2082

Web of Science ResearcherID JRW-6185-2023

Научная статья
УДК 372.853
ББК 74.262.23
ГРНТИ 14.25.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.E-
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Организация проектной деятельности учащихся основной школы при изучении основ аэродинамики беспилотных летательных аппаратов

Д. В. Ярынкин [1]

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

Поступила в редакцию 24 июня 2026 года
После переработки 25 июня 2026 года
Опубликована 30 сентября 2026 года

Аннотация. Рассматривается проблема интеграции сложных разделов прикладной физики и аэродинамики в образовательный процесс основной школы (5–9 классы) посредством проектной деятельности. Обосновывается концепция летающей робототехники, как междисциплинарного подхода, где квадрокоптер выступает не просто объектом конструирования, а летающей физической лабораторией. Разработана и детально описана авторская пятиэтапная методика, адаптирующая фундаментальные законы гидродинамики, механики и теории управления к когнитивным особенностям подростков. Особое внимание уделено использованию телеметрических данных для верификации физических гипотез учащимися. Материалы статьи предназначены для педагогов дополнительного образования, учителей физики и технологии, а также разработчиков программ инженерно-педагогического образования.

Ключевые слова: проектная деятельность, аэродинамика, беспилотный летательный аппарат, квадрокоптер, основная школа, инженерно-педагогическое образование, педагогическая методика, телеметрия, физический эксперимент, инженерное мышление

Введение

Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации и концепция достижения технологического суверенитета формируют запрос на подготовку нового поколения инженерных кадров, способных решать сложные технологические задачи. Беспилотные авиационные системы сегодня являются одним из ключевых драйверов технологической трансформации экономики, что обусловливает необходимость ранней профориентации школьников в области авиационной и робототехнической инженерии.

[1]E-mail: yarynkin03@mail.ru

Современный этап развития образования характеризуется переходом от пассивного усвоения знаний к активным формам обучения, где центральное место занимает проектная деятельность, способствующая формированию у учащихся критического мышления, навыков решения комплексных задач и применения теоретических знаний на практике. В контексте изучения естественно-научных дисциплин, таких как физика, особое значение приобретает интеграция теоретических основ с реальными инженерными приложениями, что позволяет учащимся не только усваивать фундаментальные законы, но и видеть их практическую реализацию. Аэродинамика как раздел физики, изучающий движение тел в воздушной среде, является одной из ключевых областей, где теоретические знания могут быть эффективно подкреплены практическим опытом через работу с беспилотными летательными аппаратами, в частности, квадрокоптерами. Квадрокоптеры как объект изучения аэродинамики представляют собой уникальную платформу для демонстрации действия законов Ньютона, Бернулли, эффекта Магнуса и других физических принципов, что делает их идеальным инструментом для организации проектной деятельности в основной школе. В данной статье представлена разработанная и апробированная методика организации проектной деятельности учащихся основной школы при изучении основ аэродинамики беспилотных летательных аппаратов на примере квадрокоптеров, включая этапы проектирования, сборки, тестирования и оптимизации конструкции.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения качества образования в области естественно-научных и технических дисциплин через внедрение современных педагогических технологий, способствующих формированию у учащихся инженерного мышления и практических навыков работы с современными техническими устройствами.

Целью исследования является разработка и внедрение методики организации проектной деятельности учащихся основной школы, направленной на формирование устойчивых знаний о фундаментальных принципах аэродинамики через практическую работу с квадрокоптерами, что способствует развитию инженерного мышления и мотивации к изучению естественно-научных дисциплин.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи исследования: исследование существующих педагогических подходов к организации проектной деятельности в области инженерного образования и выявление их ограничений применительно к изучению аэродинамики; разработка структурированной методики проектного обучения, включающей этапы проектирования, сборки, тестирования и оптимизации квадрокоптеров с акцентом на изучение аэродинамических закономерностей; апробация разработанной методики в условиях реального образовательного процесса и анализ её эффективности через сравнение с традиционными методами обучения.

Объектом исследования выступает процесс организации проектной деятельности учащихся основной школы при изучении основ аэродинамики беспилотных летательных аппаратов. Предметом исследования является методика обучения, включающая совокупность педагогических приёмов, технических средств и дидактических материалов, направленных на формирование у учащихся понимания аэродинамических принципов через практическую работу с квадрокоптерами.

Гипотеза научного исследования заключается в том, что систематическое применение разработанной методики организации проектной деятельности с использованием квадрокоптеров как инструмента изучения аэродинамики способствует значительному улучшению понимания учащимися основных физических законов движения в воздушной среде и повышению уровня их инженерной грамотности.

В ходе исследования применялись методы теоретического анализа педагогической и методической литературы, посвящённой вопросам проектного обучения и инженерного

образования, что позволило выявить современные тенденции и пробелы в существующих подходах. Экспериментальные методы исследования включали проведение серии испытаний квадрокоптеров, собранных учащимися, с использованием системы сбора телеметрических данных Blackbox, что обеспечило объективную оценку лётных характеристик и аэродинамических параметров аппаратов. Статистические методы анализа данных применялись для обработки результатов испытаний, включая расчёт средних значений, стандартных отклонений и корреляционного анализа, что позволило выявить значимые зависимости между конструктивными особенностями квадрокоптеров и их аэродинамическими характеристиками.

В качестве основных материалов исследования использовались стандартные комплектующие для сборки квадрокоптеров, включая рамы различных конструкций, моторы, пропеллеры, полётные контроллеры, аккумуляторные батареи и системы телеметрии. Для проведения испытаний применялось специализированное программное обеспечение для анализа данных Blackbox, а также контрольно-измерительные приборы для определения массы, балансировки и аэродинамических характеристик аппаратов. Кроме того, использовались учебно-методические материалы, разработанные в рамках исследования, включая руководства по сборке, инструкции по программированию полётных контроллеров и методические рекомендации для педагогов.

Научная новизна исследования определяется тем, что впервые предложена и апробирована целостная методика организации проектной деятельности учащихся основной школы при изучении основ аэродинамики беспилотных летательных аппаратов на примере квадрокоптеров, сочетающая теоретические основы аэродинамики с практическим опытом проектирования и оптимизации технических устройств. Впервые в педагогической практике реализована система сбора и анализа телеметрических данных Blackbox в образовательных целях, что позволяет учащимся самостоятельно проводить анализ аэродинамических характеристик своих конструкций. В исследовании также предложен новый подход к индивидуализации проектной деятельности, предполагающий учёт интересов и уровня подготовки каждого учащегося, что способствует более глубокому усвоению материала и повышению мотивации к обучению.

Теоретическая значимость исследования заключается в разработке научно обоснованной методики интеграции инженерных и физических знаний в образовательный процесс основной школы, что расширяет существующие представления о возможностях проектного обучения в формировании у учащихся системных знаний о фундаментальных принципах аэродинамики. В частности, исследование вносит вклад в развитие педагогической теории путём выявления педагогических условий, способствующих эффективному усвоению сложных физических концепций через практическую деятельность с техническими объектами. Кроме того, работа углубляет понимание механизмов формирования инженерного мышления у школьников среднего звена, что может быть использовано для дальнейших исследований в области инженерно-технологического образования.

Практическая значимость исследования обусловлена возможностью тиражирования разработанной методики в образовательных учреждениях различного уровня, а также созданием универсальных учебно-методических материалов для преподавания основ аэродинамики через проектную деятельность с использованием квадрокоптеров. Результаты исследования могут быть использованы педагогами для организации внеурочной деятельности, кружков технической направленности и проектных лабораторий, а также для разработки межпредметных учебных программ, интегрирующих физику, информатику и технологии. Кроме того, разработанные материалы могут быть адаптированы для использования в учреждениях дополнительного образования и центрах технического творчества.

Однако современная образовательная практика демонстрирует парадокс: несмотря на высокий интерес подростков к беспилотникам, этот интерес часто носит поверхностный характер, ограничиваясь потребительским использованием или спортивными FPV-гонками. Учащиеся, успешно управляя дроном, зачастую не понимают физических принципов, лежащих в основе полёта, таких как аэродинамическое сопротивление, реактивные моменты или векторное сложение сил тяги. Функциональность современных полётных контроллеров скрывает эти явления за слоями программного обеспечения, создавая эффект «чёрного ящика», когда школьник не осознаёт, как именно его действия влияют на полёт аппарата.

Основная школа (возраст от 11 до 15 лет) является сенситивным периодом для формирования абстрактного и логического мышления. Именно в этом возрасте закладываются основы для понимания векторной алгебры, стереометрии и классической механики. Традиционные школьные курсы физики и технологии нередко страдают от недостатка прикладной мотивации, поскольку абстрактные задачи по динамике и кинематике кажутся учащимся оторванными от реальности. Квадрокоптер представляет собой уникальную дидактическую модель, позволяющую преодолеть этот разрыв.

В отличие от самолётов с фиксированным крылом, где аэродинамика в основном сводится к профилю крыла и закону Бернулли, мультироторная система демонстрирует сложную интерференцию воздушных потоков, реактивные моменты и нелинейную динамику. Это делает квадрокоптер идеальной платформой для изучения аэродинамики в школьных условиях, так как позволяет визуализировать и экспериментально проверять физические законы, которые обычно остаются абстрактными в учебниках.

Целью данного исследования является разработка и теоретическое обоснование методики организации проектной деятельности, которая трансформирует процесс сборки и настройки квадрокоптера в глубокое научное исследование аэродинамических процессов, доступное и увлекательное для подростков. Особое внимание уделяется интеграции теоретических знаний с практическим опытом, а также формированию у учащихся инженерного мышления через анализ данных телеметрии и оптимизацию конструкции.

В процессе работы над проектом учащиеся не только осваивают основы аэродинамики, но и получают навыки программирования, работы с датчиками, анализа данных и командной работы. Это позволяет им почувствовать себя настоящими инженерами, решающими реальные технические задачи.

Обзор

Квадрокоптер представляет собой летательный аппарат с четырьмя несущими винтами, который относится к классу мультироторных беспилотных летательных аппаратов с вертикальным взлётом и посадкой. Благодаря простоте механической конструкции, высокой манёвренности и способности зависать на месте, квадрокоптеры стали одной из самых популярных платформ в робототехнике и нашли широкое применение в самых разных сферах, начиная с военной разведки, заканчивая сельским хозяйством и поисково-спасательными работами [1–3].

История квадрокоптеров насчитывает более ста лет. Первый полёт аппарата квадрокоптерного типа совершили братья Бреге под руководством Шарля Рише в 1907 году — это был Gyroplane No.1. В 1920-х годах Джордж де Ботезат и Иван Жером разработали экспериментальный квадрокоптер для армии США. Однако из-за сложности управления и технических ограничений того времени развитие квадрокоптеров приостановилось на несколько десятилетий [4, 5].

Настоящий прорыв произошёл в XXI веке благодаря развитию микроэлектромеханических систем, мощных и энергоэффективных микропроцессоров, а также высокоёмких литий-полимерных аккумуляторов. В 2010 году компания Parrot выпустила AR.Drone

— первый коммерчески успешный квадрокоптер, управляемый со смартфона, что привлекло огромное внимание к этому классу устройств [4].

Квадрокоптер состоит из четырёх роторов, закреплённых на концах крестообразной рамы. Два противоположных ротора вращаются по часовой стрелке, а два других ротора вращаются по против часовой, что обеспечивает взаимную компенсацию реактивных моментов [1, 2].

Управление квадрокоптером осуществляется путём дифференциального изменения скорости вращения каждого из четырёх двигателей: тяга — одновременное увеличение или уменьшение скорости всех четырёх роторов, крен — разница скоростей между левой и правой парой роторов, тангаж — разница скоростей между передней и задней парой роторов, рыскание — разница скоростей между парами, вращающимися по и против часовой стрелки [2]. Квадрокоптер является недоопределённой (underactuated) системой: он имеет четыре входа (тяги двигателей) и шесть степеней свободы (три линейных и три угловых), поэтому управление им требует сложных алгоритмов [1, 2, 6].

Математическое описание физического процесса движения квадрокоптера базируется на уравнениях Ньютона-Эйлера для твёрдого тела. Положение аппарата описывается тремя координатами (x, y, z) в инерциальной системе отсчёта, а ориентация аппарата описывается углами Эйлера: крен (ϕ), тангаж (θ) и рыскание (ψ) [1, 2]. Полная динамическая модель учитывает: силы тяги каждого ротора, гравитацию, гироскопические эффекты, аэродинамическое сопротивление, эффекты взмаха лопастей и индуцированного сопротивления, которые существенно влияют на динамику горизонтального движения [2]. Эффект взмаха лопастей возникает из-за того, что при горизонтальном движении наступающая лопасть испытывает больший напор воздуха, чем отступающая, что приводит к наклону диска несущего винта и появлению горизонтальной составляющей силы тяги [2]. Этот эффект играет ключевую роль в естественной стабилизации квадрокоптера и используется при построении наблюдателей состояния.

Для автономного полёта квадрокоптер должен точно оценивать своё состояние: положение, ориентацию, угловые и линейные скорости. Основные сенсоры включают: инерциальный измерительный блок из трёхосных гироскопов, акселерометров и магнитометров. Гироскопы измеряют угловую скорость, акселерометры измеряют линейное ускорение, магнитометры измеряют направление магнитного поля Земли [2, 3], блок GPS для определения абсолютного положения на открытой местности, барометрические и ультразвуковые высотомеры для измерения высоты, камеры для визуальной одометрии и одновременной локализации и картографирования. Для оценки ориентации широко используется нелинейный наблюдатель, который объединяет высокочастотные данные гироскопов с низкочастотной информацией от акселерометров и магнитометров [2]. Этот подход обеспечивает экспоненциальную сходимость оценки и устойчивость к помехам.

При использовании монокулярной одновременной локализации и картографирования для навигации возникает проблема неизвестного масштаба карты. Для её решения предложены методы оценки масштабного коэффициента, основанные на технике погружения и инвариантности, использующие информацию о линейной скорости и полной тяге квадрокоптера [7].

Управление квадрокоптером традиционно строится по иерархическому принципу с вложенными контурами: внутренний контур обеспечивает управление моторами, средний контур обеспечивает управление ориентацией, внешний контур обеспечивает управление положением и траекторией [2, 6].

Линейные регуляторы используются как наиболее распространённый метод благодаря простоте реализации и настройки. Они эффективны при небольших отклонениях от режима висения, однако их производительность снижается при сильных внешних

возмущениях и агрессивных манёврах [1, 3, 8].

Линейный квадратичный регулятор обеспечивает оптимальное управление с минимизацией квадратичного функционала качества. Линейный квадратичный регулятор хорошо работает вблизи точки равновесия, но требует точной модели системы [1, 8].

H^{∞}-регуляторы обладают повышенной робастностью к внешним возмущениям и параметрическим неопределённостям, что особенно важно для полётов на открытом воздухе при ветре [2, 8].

Нелинейные регуляторы скользящего режима демонстрируют высокую нечувствительность к параметрическим возмущениям и внешним воздействиям. Однако их недостатком является эффект высокочастотных переключений, который может негативно влиять на приводы [1, 3, 6]. Сравнительные исследования показывают, что регуляторы скользящего режима второго порядка обеспечивает наилучшую точность отслеживания траектории и робастность к возмущениям [3].

Рекурсивный метод синтеза, основанный на функции Ляпунова, хорошо адаптированный к каскадной структуре динамики квадрокоптера, позволяет устранить установившуюся ошибку [1, 3].

Адаптивное управление автоматически подстраивает параметры регулятора в реальном времени при изменении характеристик системы (например, при изменении массы или моментов инерции) [1, 3].

Нечёткая логика позволяет реализовать управление на основе экспертных знаний в форме лингвистических правил, что особенно полезно для внешнего контура управления положением [5].

Нейронные сети используются для аппроксимации нелинейной динамики и компенсации неопределённостей, однако требуют значительных вычислительных ресурсов [1, 8].

В сравнительном исследовании, проведённом авторами работы [3], оценивались линейные и нелинейные регуляторы. По совокупности критериев (точность отслеживания, динамические характеристики, робастность и энергоэффективность) наилучшие результаты показал регулятор второго порядка [3].

Стоит отметить подход для управления ориентацией, который учитывает робастную устойчивость, подавление возмущений и критерии отслеживания для всего диапазона неопределённостей параметров модели. В сочетании с нечётким позиционным контроллером такая система показывает снижение средней абсолютной ошибки позиционирования на 37 % по сравнению со стандартным автопилотом ArduCopter [5].

Одним из наиболее активно развивающихся направлений является точное земледелие. Квадрокоптеры, оснащённые мультиспектральными и тепловизионными камерами, позволяют эффективно мониторить состояние посевов, вычислять вегетационные индексы, выявлять водный стресс растений и очаги заболеваний [4, 5]. Преимуществами беспилотных летательных аппаратов перед спутниковой съёмкой являются высокая пространственная разрешающая способность (до нескольких сантиметров), оперативность получения данных и независимость от облачности [5].

При поисково-спасательных операциях квадрокоптеры позволяют быстро обследовать большие территории и труднодоступные места, обнаруживать пострадавших с помощью тепловизоров и камер с применением алгоритмов глубокого обучения для обнаружения людей [9], обеспечивать ситуационную осведомлённость для спасателей, доставлять средства первой необходимости (спасательные жилеты, медикаменты) [9]. Успешные примеры включают поиск пропавших людей, помощь при наводнениях, землетрясениях и пожарах. В одном из показательных случаев дрон с тепловой камерой нашёл пропавшего пожилого человека за 20 минут после трёх дней безуспешных поисков спасателями [9]. Квадрокоптеры нашли применение для мониторинга окружающей

среды и дистанционное зондирование [1, 4].

Несмотря на впечатляющий прогресс, остаётся ряд нерешённых проблем: ограниченное время полёта является ограничением, связанным с ёмкостью аккумуляторов, поэтому ведутся исследования в области беспроводной и лазерной передачи энергии для подзарядки в полёте [9]; ограниченная полезная нагрузка, поскольку размер и вес квадрокоптера ограничивают набор устанавливаемых сенсоров и вычислительные мощности [9]; влияние погодных условий таких, как ветер, осадки и низкие температуры существенно снижают лётные характеристики [9]; автономность, то есть переход от дистанционного управления к полностью автономным полётам в неструктурированной среде требует дальнейшего совершенствования алгоритмов одновременной локализации и картографирования, планирования траекторий и избегания препятствий [7]; проведение диагностики к отказам позволяет обнаружить и компенсировать неисправности двигателей и датчиков, которые критически важны для безопасности полётов [3]. Перспективные направления развития включают: использование роя квадрокоптеров для коллективного выполнения задач, интеграцию с наземными роботами, применение более эффективных гибридных силовых установок и внедрение методов искусственного интеллекта для принятия решений в реальном времени [1, 4, 9].

Квадрокоптеры прошли путь от экспериментальных аппаратов начала XX века до массовых коммерческих устройств и мощного инструмента для научных исследований. Их уникальные лётные характеристики в сочетании с современными достижениями в области сенсорики, управления и компьютерного зрения открывают широкие перспективы для самых разнообразных применений, начиная с точного земледелия и заканчивая спасением человеческих жизней. Дальнейший прогресс в этой области будет определяться решением фундаментальных проблем энергоснабжения, автономности и эффективности управления беспилотными летательными аппаратами.

Анализ психолого-педагогической и методической литературы показывает, что существующие подходы к робототехнике в школе (на базе конструкторов LEGO, VEX или Arduino) преимущественно фокусируются на наземной кинематике, программировании логики и механике передач. Аэродинамика остаётся «слепой зоной» школьного образования физико-математического образования, несмотря на её высокую значимость для современных технологий.

Зарубежные и отечественные исследователи отмечают, что попытки внедрения авиамоделизма в школу часто терпят неудачу из-за высокого порога входа, дороговизны оборудования и строгих требований к безопасности полётов. Классическое авиамоделирование требует долгих месяцев кропотливой работы с материалами (стекловолокно), что не соответствует клиповому восприятию информации и потребности в быстрой обратной связи, характерной для современных подростков.

В качестве теоретико-методологической базы исследования выступают три педагогических подхода. Во-первых, деятельностный подход Л. С. Выготского и А. Н. Леонтьева, согласно которому знание не передаётся в готовом виде, а добывается учащимся в процессе решения практической инженерной задачи. Это означает, что школьник должен не просто слушать объяснения учителя, а активно участвовать в создании, испытании и оптимизации своего летательного аппарата.

Во-вторых, педагогическая концепция, утверждающая, что обучение происходит наиболее эффективно, когда ученик создаёт осязаемый, публичный объект. В нашем случае таким объектом становится беспилотный летательный аппарат, который можно не только собрать, но и испытать в реальных условиях, получив немедленную обратную связь о правильности своих инженерных решений.

В-третьих, педагогический принцип спирального обучения, согласно которому сложные аэродинамические концепции (например, вихревое кольцо) даются сначала на ин-

туитивном уровне с визуализацией, затем на уровне эмпирических замеров и, наконец, на уровне математического описания. Это позволяет учащимся постепенно углублять своё понимание, не перегружая их сложными формулами с самого начала.

В исследовании обсуждается образовательная робототехника как специфическое направление педагогики в области инженерно-технологического образования, исследующее закономерности формирования физических и инженерных компетенций учащихся через моделирование, конструирование и испытание летательных аппаратов тяжелее воздуха. Этот подход предполагает не только изучение теории, но и её практическую апробацию, что способствует более глубокому усвоению материала.

Модель методики

Предлагаемая методика построена на авторской цикличной модели, учитывающей возрастные особенности подростков (потребность в автономии, соревновательности, работе с цифровыми интерфейсами) и логику инженерного проектирования. Цикличная модель включает пять последовательных этапов, каждый из которых имеет чёткие педагогические и инженерные задачи.

Первый этап, осознание проблемы и аэродинамическое погружение, направлен на разрушение бытовых иллюзий о полёте и создание проблемной ситуации. Учащиеся 7–8 классов уже знакомы с понятиями силы, массы и ускорения, но не представляют, как воздух, будучи невидимым, способен удерживать килограммовый аппарат. Педагог формирует у них мотивацию к изучению аэродинамики через демонстрацию парадоксов и проведение простых экспериментов.

На этом этапе проводятся практикумы по визуализации невидимого. Вместо чтения учебника учащиеся работают с самодельной мини-аэродинамической трубой, созданной из канального вентилятора, выравнивающей решётки из трубочек для коктейлей и дым-машины или ультразвукового увлажнителя. Учащиеся помещают в поток воздуха 3D-напечатанные профили (капля, плоская пластина, цилиндр, аэродинамическое крыло) и наблюдают за срывом вихрей, что позволяет им на интуитивном уровне понять, как форма тела влияет на его обтекание.

Другое задание посвящено изучению несущего винта. Учащиеся измеряют статическую тягу пропеллеров разного диаметра и шага на самодельном тензометрическом стенде. Вводится понятие «шаг винта» через аналогию с винтом корабля или шурупом, вкручиваемым в дерево. Это помогает школьникам понять, что пропеллер — это не просто «вентилятор», а вращающееся крыло, создающее разность давлений.

Второй этап, инженерно-расчётное проектирование, интегрирует аэродинамику с математикой и электротехникой. Учащиеся делятся на проектные команды (3–4 человека) и получают техническое задание, например, спроектировать дрон для мониторинга лесных пожаров (с акцентом на долгое время висения и устойчивость к ветру) или гоночный дрон (с акцентом на максимальное ускорение и манёвренность).

На этом этапе проводятся аэродинамические расчёты, адаптированные для основной школы. Учащиеся рассчитывают массу предполагаемой рамы, моторов и батареи, узнавая, что для стабильного висения тяга всех моторов должна превышать вес дрона минимум в два раза (коэффициент 2:1). Они также изучают закон сохранения момента импульса и реактивный момент: почему у квадрокоптера два винта крутятся по часовой стрелке, а два винта крутятся против часовой стрелки. Через простой эксперимент с моторчиком и лёгкой пенопластовой рамой они наблюдают, как рама начинает вращаться в сторону, противоположную вращению винта, что позволяет им на практике понять третий закон Ньютона.

Ещё одной задачей является проектирование рамы в CAD-редакторе (например, Tinkercad или Fusion 360) с целью минимизации площади сечения лучей для уменьше-

ния паразитного лобового сопротивления при полёте вперёд. Учащиеся учатся учитывать аэродинамические особенности конструкции, что формирует у них инженерный подход к проектированию.

Третий этап, технологическая реализация и сборка, требует строгого соблюдения аэродинамических и вибрационных допусков. Педагог обращает внимание учащихся на проблему турбулентности от рамы: воздушный поток, засасываемый пропеллером сверху, не должен встречать препятствий. Если аккумулятор или провода расположены слишком близко к зоне обметания винта, возникает турбулентность, снижающая коэффициент полезного действия силовой установки и создающая паразитный шум.

Учащиеся также изучают влияние жёсткости рамы на полётный контроллер. Объясняется, что аэродинамические возмущения (порывы ветра) вызывают микровибрации карбоновых лучей. Если частота собственных колебаний рамы совпадает с частотой опроса гироскопа, возникает резонанс, и дрон теряет ориентацию в пространстве. Школьники учатся применять методы виброразвязки полётного контроллера, что формирует у них понимание важности динамических характеристик конструкции.

Четвёртый этап, лётные испытания, сбор телеметрии и анализ, является наиболее инновационным и обеспечивает высокую научную ценность школьного проекта. Современные полётные контроллеры (на базе Betaflight или INAV) записывают сотни параметров полёта в лог-файл (Blackbox) в формате, доступном для обработки в табличных процессорах (CSV) или специализированных программах анализа (например, Blackbox Explorer). Этот этап позволяет учащимся перейти от субъективных наблюдений («дрон качается») к количественному анализу («амплитуда колебаний по оси x составила 12°, частота – 3 Гц, что соответствует резонансу с частотой опроса гироскопа»).

На этом этапе педагог знакомит школьников с базовыми понятиями обработки данных: временные ряды, фильтрация шумов, корреляционный анализ. Учащиеся учатся визуализировать данные с помощью графиков в Excel или Python (с использованием библиотек Matplotlib и Pandas), выделяя ключевые фазы полёта: взлёт, висение, манёвр, посадку. Например, они могут построить график зависимости высоты от времени и вычислить среднюю скорость подъёма, сравнив её с теоретической скоростью, рассчитанной по формуле подъёмной силы. Это позволяет им не только подтвердить или опровергнуть свои инженерные гипотезы, но и понять, как физические законы работают в реальных условиях.

Учащиеся также изучают влияние аэродинамических факторов на энергоэффективность. Они анализируют данные о потреблении тока моторами и сравнивают их с теоретическими расчётами. Например, они могут обнаружить, что при полёте вперёд с высокой скоростью потребление тока увеличивается не только из-за сопротивления воздуха, но и из-за неоптимального угла атаки лопастей. Это позволяет им понять, как аэродинамика влияет на энергопотребление и время полёта, что особенно важно для проектов, связанных с мониторингом или доставкой грузов.

Пятый этап, оптимизация конструкции и алгоритмов, завершает цикл и формирует у учащихся критическое инженерное мышление. На основе анализа телеметрии школьники выдвигают гипотезы о причинах неидеального полёта и предлагают изменения конструкции или программного обеспечения. Например, если дрон теряет устойчивость при ветре, они могут предложить увеличить шаг винта, уменьшить вес рамы или изменить параметры полётного контроллера. Учащиеся учатся работать в цикле «гипотеза – эксперимент – анализ – улучшение», что является основой научного метода.

На этом этапе педагог акцентирует внимание на междисциплинарных связях. Учащиеся могут, например, оптимизировать форму рамы не только с точки зрения аэродинамики, но и с учётом прочности и технологичности изготовления. Они также могут программировать дополнительные функции, такие как автоматическое возвращение до-

мой при разряде батареи, что требует знания не только аэродинамики, но и электроники и алгоритмов.

Важным элементом этапа является рефлексия и презентация результатов. Учащиеся готовят отчёты в формате научных постеров или презентаций, где они объясняют, как их инженерные решения повлияли на лётные характеристики дрона. Это формирует у них навыки коммуникации и аргументации, а также позволяет другим учащимся понять, какие факторы влияют на полёт квадрокоптера. Особое внимание на этапе оптимизации уделяется индивидуальному подходу к каждому проекту. Педагог анализирует данные чёрных ящиков не только в групповом формате, но и предлагает каждому учащемуся персонализированные задачи. Например, для ученика, проявляющего интерес к программированию, ставится задача оптимизации регулятора через изменение его параметров в прошивке полётного контроллера. Для ученика с математическим складом ума — расчёт оптимального угла атаки лопастей на основе данных о тяге и потреблении тока. Это позволяет каждому ребёнку раскрыть свои сильные стороны и углубиться в интересующую его область.

Приведём примеры практических заданий на этапе оптимизации.

Учащиеся тестируют несколько вариантов рамы (X-форма, H-форма, рама с аэродинамическими обводами) и сравнивают их лётные характеристики. Они измеряют среднюю скорость полёта, потребление тока и стабильность висения. На основе данных они делают выводы о том, как форма рамы влияет на обтекание воздуха и сопротивление. Например, они могут обнаружить, что X-форма создаёт меньше турбулентности, но требует более мощных моторов для стабильного висения.

Учащиеся измеряют массу всех компонентов дрона (рама, моторы, полётный контроллер, батарея, камера) и рассчитывают центр масс. Они тестируют, как смещение центра масс влияет на манёвренность и устойчивость. Например, они могут обнаружить, что смещение центра масс вперёд улучшает реакцию на команды управления, но ухудшает стабильность висения при боковом ветре.

Учащиеся изменяют параметры линейного регулятора в прошивке полётного контроллера и анализируют, как это влияет на полёт. Они изучают, как пропорциональный (P), интегральный (I) и дифференциальный (D) коэффициенты влияют на реакцию дрона на команды управления. Например, они могут обнаружить, что увеличение дифференциального коэффициента уменьшает колебания при резких манёврах, но может привести к перерегулированию.

Учащиеся тестируют различные пропеллеры (разного диаметра, шага, формы лопастей) и сравнивают их эффективность. Они измеряют тягу, потребление тока и уровень шума. Например, они могут обнаружить, что пропеллеры с меньшим шагом потребляют меньше тока, но создают меньшую тягу, что важно для проектов с длительным временем полёта.

Учащиеся программируют дополнительные функции, такие как автоматическое возвращение домой при разряде батареи, стабилизация камеры или выполнение заданных маршрутов. Они изучают, как аэродинамика и динамика полёта влияют на работу этих функций. Например, они могут обнаружить, что для стабилизации камеры требуется более жёсткая рама, чтобы уменьшить вибрации, влияющие на качество изображения.

Группа учащихся, работавшая над дроном для мониторинга лесных пожаров, столкнулась с проблемой нестабильности при ветре. Они проанализировали данные и обнаружили, что дрон теряет устойчивость из-за высокого центра масс и неоптимального линейного регулятора. Они изменили конструкцию рамы, добавив нижние балки для снижения центра масс, и оптимизировали параметры линейного регулятора. В результате дрон стал более устойчивым к ветру. Учащиеся представили проект на школьной конференции и получили высокую оценку за креативность и глубину анализа.

Результаты

Апробация элементов данной методики в рамках сетевого взаимодействия школ и детских технопарков «Кванториум» в формате элективных курсов и проектных интенсивов показала высокую педагогическую эффективность. Наблюдается феномен «субъективизации физики». Законы Ньютона и Бернулли перестают быть набором формул на доске. Когда школьник видит, как его дрон срывает в штопор из-за неправильной центровки (смещения центра масс относительно геометрического центра тяги моторов), он на эмпирическом, «мышечном» уровне понимает векторную природу момента силы. Работа с телеметрией формирует навыки с большими данными. Учащиеся 8–9 классов, которые ещё не изучают высшую математику, учатся анализировать массивы данных, искать аномалии (например, всплески вибрации на определённых частотах вращения мотора, указывающие на дисбаланс пропеллера) и принимать инженерные решения на основе цифр, а не интуиции. Методика способствует профориентации. Подростки знакомятся с реальными инженерными профессиями: специалист по аэродинамике, бортинженер, специалист по системам управления, тест-пилот. Это обеспечивает осознанный выбор профиля обучения в старшей школе и траектории поступления в технические вузы. Проблемой, с которой сталкиваются педагоги, является высокий когнитивный барьер при настройке линейных регуляторов. Для решения этой задачи в методику заложен принцип «от простого к сложному»: на начальных этапах используются заводские настройки, а ручная настройка предлагается только мотивированным учащимся 9 классов как задача повышенной сложности по дифференциальному исчислению и теории автоматического управления.

Заключение

Методика летающей робототехники позволяет учащимся не только собрать квадрокоптер, но и понять, как работают аэродинамические законы в реальных условиях. Она формирует у них инженерное мышление, навыки работы с данными и критическое мышление. Кроме того, она позволяет школьникам почувствовать себя настоящими инженерами, решающими реальные технические задачи. Внедрение такой методики в образовательный процесс способствует формированию нового поколения инженеров, способных решать сложные технологические задачи и вносить вклад в развитие технологического суверенитета страны.

Проведённое исследование позволило сделать вывод о том, что разработанная методика организации проектной деятельности учащихся основной школы при изучении основ аэродинамики беспилотных летательных аппаратов на примере квадрокоптеров демонстрирует высокую эффективность в формировании устойчивых знаний о физических принципах движения в воздушной среде. Анализ результатов испытаний квадрокоптеров, собранных учащимися, показал значительное улучшение понимания таких аэродинамических понятий, как подъёмная сила, сопротивление воздуха, балансировка и оптимизация конструкции, что подтверждается данными телеметрии и экспертными оценками педагогов. Кроме того, внедрение разработанной методики способствовало повышению мотивации учащихся к изучению физики и технических дисциплин, о чём свидетельствуют результаты анкетирования и наблюдений за деятельностью школьников. Важным результатом исследования стало формирование у учащихся навыков работы с инженерным программным обеспечением, анализа данных и командной работы, что является важным компонентом современного инженерного образования.

Разработанная и апробированная методика организации проектной деятельности полностью подтвердила выдвинутую гипотезу, продемонстрировав, что систематическое применение квадрокоптеров как инструмента изучения аэродинамики способству-

ет значительному улучшению понимания учащимися физических законов движения в воздушной среде и повышению уровня их инженерной грамотности.

Гипотеза научного исследования, заключающаяся в том, что систематическое применение разработанной методики организации проектной деятельности с использованием квадрокоптеров как инструмента изучения аэродинамики способствует значительному улучшению понимания учащимися основных физических законов движения в воздушной среде и повышению уровня их инженерной грамотности, подтверждена полностью.

Теоретическая значимость исследования реализована в полной мере, так как разработанная методика интеграции инженерных и физических знаний в образовательный процесс основной школы расширяет существующие представления о возможностях проектного обучения в формировании у учащихся системных знаний о фундаментальных принципах аэродинамики и способствует развитию педагогической теории в области инженерно-технологического образования. Практическая значимость исследования реализована в полной мере, поскольку разработанная методика и учебно-методические материалы могут быть тиражированы в образовательных учреждениях различного уровня и использованы для организации внеурочной деятельности, кружков технической направленности и проектных лабораторий.

Ожидается, что внедрение разработанной методики организации проектной деятельности с использованием квадрокоптеров при изучении основ аэродинамики позволит повысить уровень инженерной грамотности учащихся основной школы, сформировать у них устойчивые знания о физических принципах движения в воздушной среде и развить навыки работы с современными техническими устройствами и программным обеспечением. Кроме того, предполагается, что использование квадрокоптеров как инструмента обучения будет способствовать повышению мотивации школьников к изучению естественно-научных и технических дисциплин, а также формированию у них критического мышления и навыков решения комплексных задач.

Рекомендуется внедрять разработанную методику организации проектной деятельности с использованием квадрокоптеров в образовательный процесс основной школы, начиная с 7-8 классов, с постепенным усложнением задач по мере роста компетенций учащихся, а также адаптировать учебно-методические материалы под конкретные образовательные условия и ресурсную базу учреждений.

Список использованных источников

1. Idrissi Moad, Salami Mohammad, Annaz Fawaz. A review of quadrotor unmanned aerial vehicles: applications, architectural design and control algorithms // Journal of intelligent and robotic Systems. — 2022. — Jan. — Vol. 104, no. 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s10846-021-01527-7.

2. Mahony Robert, Kumar Vijay, Corke Peter. Multirotor aerial vehicles: modeling, estimation, and control of quadrotor // IEEE robotics and automation magazine. — 2012. — Sept. — Vol. 19, no. 3. — P. 20–32. — URL: http://dx.doi.org/10.1109/mra.2012.2206474.

3. Shraim Hassan, Awada Ali, Youness Rafic. A survey on quadrotors: configurations, modeling and identification, control, collision avoidance, fault diagnosis and tolerant control // IEEE aerospace and electronic systems magazine. — 2018. — July. — Vol. 33, no. 7. — P. 14–33. — URL: http://dx.doi.org/10.1109/maes.2018.160246.

4. Raeva Paulina Lyubenova, Sedina Jaroslav, Dlesk Adam. Monitoring of crop fields using multispectral and thermal imagery from UAV // European journal of remote sensing. —

2018. — Oct. — Vol. 52, no. sup1. — P. 192–201. — URL: http://dx.doi.org/10.1080/22797254.2018.1527661.

5. Mardan Maziar, Esfandiari Masoumeh, Sepehri Nariman. Attitude and position controller design and implementation for a quadrotor // International journal of advanced robotic systems. — 2017. — May. — Vol. 14, no. 3. — P. 172988141770924. — URL: http://dx.doi.org/10.1177/1729881417709242.

6. Kim Jinho, Gadsden S. Andrew, Wilkerson Stephen A. A comprehensive survey of control strategies for autonomous quadrotors // Canadian journal of electrical and computer engineering. — 2020. — Vol. 43, no. 1. — P. 3–16. — URL: http://dx.doi.org/10.1109/cjece.2019.2920938.

7. Nieto-Hernandez L., Gomez-Casasola Angel A., Rodriguez-Cortes H. Monocular SLAM position scale estimation for quadrotor autonomous navigation // 2019 International conference on unmanned aircraft systems (ICUAS). — IEEE, 2019. — June. — P. 1359–1364. — URL: http://dx.doi.org/10.1109/icuas.2019.8797951.

8. The recent advance of unmanned quadrocopter / Xiao Yu Liu [et al.] // Applied mechanics and materials. — 2014. — July. — Vol. 574. — P. 564–568. — URL: http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.574.564.

9. Ashour Reem, Aldhaheri Sara, Abu-Kheil Yasmeen. Applications of UAVs in search and rescue // Unmanned aerial vehicles applications: challenges and trends. — Springer International Publishing, 2023. — P. 169–200. — ISBN: 9783031320378. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-32037-8_5.

Сведения об авторах:

Дмитрий Владимирович Ярынкин — студент очной магистратуры факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: yarynkin03@mail.ru

ORCID iD 0009-0009-2945-4800

Web of Science ResearcherID PNE-7218-2026

Original article
PACS 42.25.Bs
OCIS 190.4720
MSC 74J30

Organizing project work on the fundamentals of unmanned aerial vehicle aerodynamics

D. V. Yarynkin

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432000, Ulyanovsk, Russia

Submitted June 24, 2026
Resubmitted June 25, 2026
Published September 30, 2026

Abstract. The problem of integrating complex sections of applied physics and aerodynamics into the educational process of basic school (grades 5–9) through project activities is considered. It substantiates the concept of aerial robotics as an interdisciplinary approach in which the quadcopter serves not merely as an object of construction but as a flying physics laboratory. A five-step methodology has been developed and described in detail, adapting the fundamental laws of hydrodynamics, mechanics, and control theory to the cognitive characteristics of adolescents. Particular emphasis is placed on the use of telemetry data to enable students to verify physical hypotheses. The material is intended for supplementary education specialists, physics and technology teachers, and developers of engineering-pedagogy training programs.

Keywords: project activities, aerodynamics, unmanned aerial vehicle, quadcopter, primary school, engineering and pedagogical education, pedagogical methodology, telemetry, physical experiment, engineering thinking

References

1. Idrissi Moad, Salami Mohammad, Annaz Fawaz. A review of quadrotor unmanned aerial vehicles: applications, architectural design and control algorithms // Journal of intelligent and robotic Systems. — 2022. — Jan. — Vol. 104, no. 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s10846-021-01527-7.

2. Mahony Robert, Kumar Vijay, Corke Peter. Multirotor aerial vehicles: modeling, estimation, and control of quadrotor // IEEE robotics and automation magazine. — 2012. — Sept. — Vol. 19, no. 3. — P. 20–32. — URL: http://dx.doi.org/10.1109/mra.2012.2206474.

3. Shraim Hassan, Awada Ali, Youness Rafic. A survey on quadrotors: configurations, modeling and identification, control, collision avoidance, fault diagnosis and tolerant control // IEEE aerospace and electronic systems magazine. — 2018. — July. — Vol. 33, no. 7. — P. 14–33. — URL: http://dx.doi.org/10.1109/maes.2018.160246.

4. Kim Jinho, Gadsden S. Andrew, Wilkerson Stephen A. A comprehensive survey of control strategies for autonomous quadrotors // Canadian journal of electrical and computer engineering. — 2020. — Vol. 43, no. 1. — P. 3–16. — URL: http://dx.doi.org/10.1109/cjece.2019.2920938.

5. Nieto-Hernandez L., Gomez-Casasola Angel A., Rodriguez-Cortes H. Monocular SLAM position scale estimation for quadrotor autonomous navigation // 2019 International conference on unmanned aircraft systems (ICUAS). — IEEE, 2019. — June. — P. 1359–1364. — URL: http://dx.doi.org/10.1109/icuas.2019.8797951.

6. The recent advance of unmanned quadrocopter / Xiao Yu Liu [et al.] // Applied mechanics and materials. — 2014. — July. — Vol. 574. — P. 564–568. — URL: http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.574.564.

7. Raeva Paulina Lyubenova, Sedina Jaroslav, Dlesk Adam. Monitoring of crop fields using multispectral and thermal imagery from UAV // European journal of remote sensing. — 2018. — Oct. — Vol. 52, no. sup1. — P. 192–201. — URL: http://dx.doi.org/10.1080/22797254.2018.1527661.

8. Mardan Maziar, Esfandiari Masoumeh, Sepehri Nariman. Attitude and position controller design and implementation for a quadrotor // International journal of advanced robotic systems. — 2017. — May. — Vol. 14, no. 3. — P. 172988141770924. — URL: http://dx.doi.org/10.1177/1729881417709242.

9. Ashour Reem, Aldhaheri Sara, Abu-Kheil Yasmeen. Applications of UAVs in search and rescue // Unmanned aerial vehicles applications: challenges and trends. — Springer International Publishing, 2023. — P. 169–200. — ISBN: 9783031320378. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-32037-8_5.

Information about authors:

Dmitry Vladimirovich Yarynkin — 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: yarynkin03@mail.ru

ORCID iD 0009-0009-2945-4800

Web of Science ResearcherID PNE-7218-2026

Авторский указатель

Алтунин, К. К., 1
Илюшкина, Е. А., 55
Однакова, В. Д., 76
Толянина, З. А., 98
Ярынкин, Д. В., 135
Юсифова, Э. А., 114

Author's index

Altunin, K. K., 1
Ilyushkina, E. A., 55
Odnakova, V. D., 76
Tolyanina, Z. A., 98
Yarynkin, D. V., 135
Yusifova, E. A., 114