

УДК 535.513: 537.862: 539.2: 621.396.67: 661.862: 669.14: 678.07

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМ И ПРИКЛАДНЫМ АСПЕКТАМ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ, СОВРЕМЕННОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ, ФИЗИКЕ НАНО- И МЕТАМАТЕРИАЛОВ, ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ В ГОМЕЛЬСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ИМ. Ф. СКОРИНЫ

С.А. Хахомов, И.В. Семченко, А.П. Балмаков, А.Л. Самофалов

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

RESEARCH ON THE FUNDAMENTAL AND APPLIED ASPECTS OF ELECTRODYNAMICS, MODERN MATERIALS SCIENCE, PHYSICS OF NANO- AND METAMATERIALS, TECHNOLOGY OF COATING IN F. SCORINA GOMEL STATE UNIVERSITY

S.A. Khakhomov, I.V. Semchenko, A.P. Balmakou, A.L. Samofalov

F. Scorina Gomel State University

Работа представляет собой обзор результатов исследований, произведенных в рамках направления «Многofункциональные материалы и технологии», приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, выполненных в ГГУ им. Ф. Скорины.

Ключевые слова: метаматериал, безэховая камера, покрытие, вакуумно-плазменная технология, золь-гель технология.

The paper is a review of the results of studies carried out in Francisk Scorina Gomel State University within the framework of the “Multifunctional materials and technologies” direction, priority areas of scientific research of the Republic of Belarus for 2016-2020.

Keywords: metamaterial, anechoic chamber, coating, vacuum-plasma technology, sol-gel technology.

Введение

В Гомельском государственном университете имени Франциска Скорины научные исследования в области материаловедения, как междисциплинарного раздела науки, изучающего изменения свойств материалов (структуры, термических, химических, механических, магнитных, оптических) в твердом и жидком состояниях в зависимости от различных факторов проводятся с 70-х годов 20-го века под руководством В.А. Белого [1], [2], Б.В. Бокутя [3], А.В. Рогачева [4].

Существенный вклад в развитие данного направления внесли А.Н. Сердюков [3], [5], Г.С. Митюрин [6], Д.Г. Лин [7], И.М. Мельниченко [8], [9] и др.

В ГГУ им. Ф. Скорины работают 5 научно-исследовательских лабораторий.

1 Межкафедральная научно-исследовательская лаборатория «Физика волновых процессов»

Лаборатория «Физика волновых процессов», созданная приказом ректора №779 от 20 сентября 1999 года, научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор И.В. Семченко, в определенной степени продолжает и развивает направления работы [10]–[12] отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Синтез», которая была создана при кафедре

радиофизики в мае 1974 года и существовала до конца 1991 года под руководством кандидата технических наук доцента В.Н. Мизгайлова [13]. Одной из научных групп в составе НИЛ «Синтез» руководил также кандидат технических наук, доцент И.Ф. Добровольский [14].

В 1974–1975 гг. в университете были созданы безэховые камеры: прямоугольная размером поверхности 20 м^2 и рупорная размером 30 м^2 , разработанные на кафедре радиофизики для студентов физического факультета по циклу «Распространение радиоволн». Внутренняя поверхность прямоугольной безэховой камеры была облицована специальным высокочастотным радиопоглощающим материалом БМП-1, представляющем собой пенопластовые блоки, в которые установлены элементы конусовидной формы («ёлочки»), выполненные из стекловолокна (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Пенопластовый блок, содержащий конусовидные элементы из стекловолокна

В 2018 году проведено обновление безэховой камеры в ГГУ им. Ф. Скорины с помощью широкодиапазонного поглотителя электромагнитных волн (ПЭВ) «ТОРА», который представляет собой диэлектрический радиопоглощающий материал пирамидального типа в виде панелей из эластичного пенополиуретана с углеродным наполнителем и предназначен для покрытия внутренних поверхностей в высококачественных безэховых камерах (рисунки 1.2, 1.3). ПЭВ «ТОРА» обеспечивает проведение высокоточных измерений характеристик антенной техники и испытаний радиоэлектронной аппаратуры на электромагнитную совместимость и по своим электродинамическим и эксплуатационным характеристиками не уступает лучшим мировым аналогам.

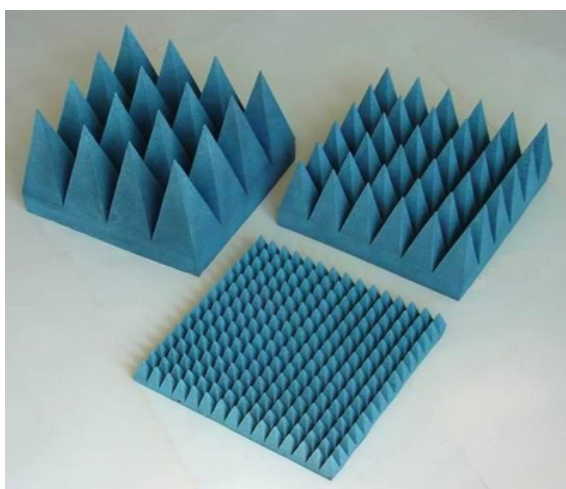


Рисунок 1.2 – Пирамидальные поглотители «ТОРА»

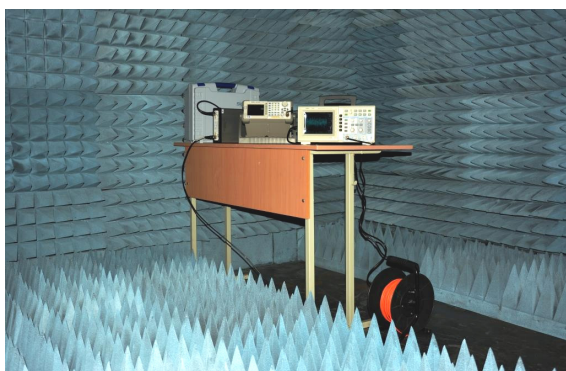


Рисунок 1.3 – Обновленная безэховая камера ГГУ (2018)

Основные направления работы лаборатории «Синтез» определялись задачами, стоявшими в то время перед университетом и промышленностью и включали в себя исследования возможности формирования слабонаправленных диаграмм антенными системами, размещаемыми на объектах сложной формы; исследования и разработки методов решения практических задач возбуждения системы излучателей и их согласование в

диапазоне частот; разработку радиофизических методов измерений и создание стендовой аппаратуры и др. В 1981 г. на работу в НИЛ «Синтез» после окончания физического факультета Гомельского государственного университета был распределён молодой специалист И.В. Семченко, который проработал там до поступления в аспирантуру в ноябре 1981 г. Хотя в то время И.В. Семченко занимался исследованиями в области оптики, работа в НИЛ «Синтез» в большой степени повлияла на выбор направления его дальнейших исследований. Приблизительно через 10 лет вектор научного интереса гомельских физиков совершил характерный виток, и на физическом факультете начались исследования искусственных структур с би-анизотропными и киральными свойствами, а впоследствии – метаматериалов и метаповерхностей. Произошла корректировка направления научных исследований от антенных систем к преобразователям поляризации и поглотителям СВЧ и ТГц волн на основе метаматериалов.

Основные направления работы лаборатории «Физика волновых процессов» в настоящее время: изучение электродинамики искусственных анизотропных структур; расчет, конструирование и создание метаматериалов с особыми диэлектрическими и магнитными свойствами в микроволновом и СВЧ диапазоне; разработка физических основ взаимодействия электромагнитного поля с биологическими объектами; развитие методов исследования акустических волн в средах с искусственной анизотропией [15]. В 2001 г. сотрудниками лаборатории совместно с финскими учеными (авторы А.Н. Сердюков, И.В. Семченко, С.А. Третьяков, А.Г. Сихвола) на английском языке опубликована монография «Электродинамика би-анизотропных материалов. Теория и приложения» объёмом 337 страниц в международном научном издательстве Gordon and Breach Science Publishers, которая стала одной из наиболее цитируемых монографий по данной тематике: по базе данных Google Scholar на июль 2018 года – 476 ссылок [5].

Ученые лаборатории имеют достижения на мировом уровне в области создания и исследования метаматериалов, о чем свидетельствуют публикации в журналах *Physical Review X* [16], *Physical Review B* [17], других престижных международных журналах с высоким импакт-фактором [18]–[27].

К наиболее важным результатам можно отнести, например, то, что на основе спиральных элементов удалось создать широкополосные безотражательные метаповерхности с частотно-селективным прохождением и идеальным поглощением [16] (рисунок 1.4), рассчитать киральный метаматериал с единичным отрицательным показателем преломления [28] (рисунки 1.4–1.7).

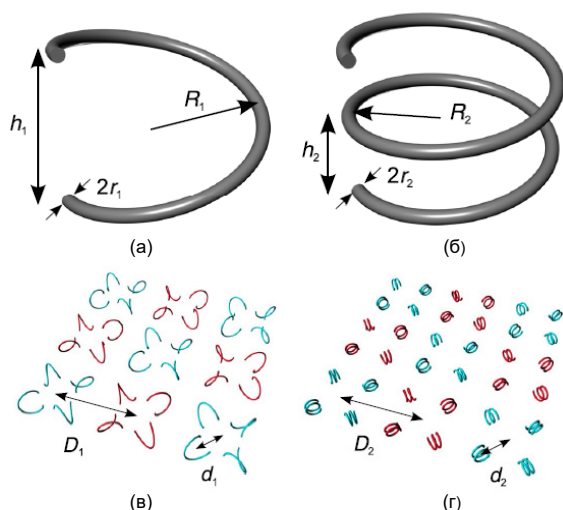


Рисунок 1.4 – Одновитковые (а) и двухвитковые (б) спиральные элементы. Расположение одновитковых (в) и двухвитковых (г) спиральных включений в массивах. Синий и красный цвета обозначают правые и левые спирали соответственно [16]

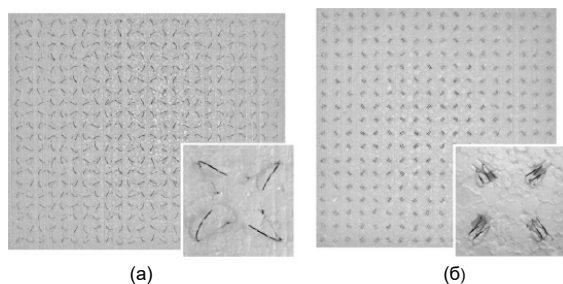


Рисунок 1.5 – Изготовленные метаповерхности из одновитковых (а) и двухвитковых (б) спиралей, содержащие соответственно 480 и 324 элемента, закрепленных в пенопласте [16]

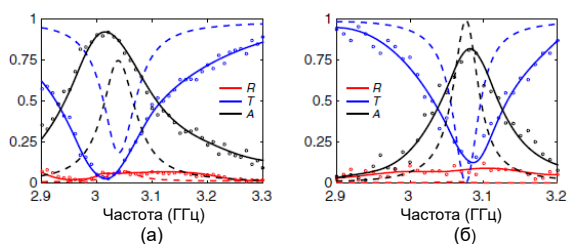


Рисунок 1.6 – Измеренные и моделированные коэффициенты отражения R , прохождения T и поглощения A для метаповерхности с (а) одно- и (б) двухвитковыми включениями. Точки обозначают измеренные значения. Сплошные линии – кривые огибающей измеренных данных. Пунктирные линии показывают соответствующие моделируемые коэффициенты измеренных образцов [16]

На основе оптимальных спиральных элементов возможна реализация тонкой поглощающей метаповерхности, которая не отражает волны в широком частотном диапазоне, в то

время как коэффициент прохождения имеет минимум в полосе полного поглощения (рисунок 1.6). Такая метаповерхность реализуется использованием киральных частиц в элементарных ячейках, расположенных в периодическом плоском рацемическом массиве, что компенсирует киральность на макроскопическом уровне. Такой подход имеет широкий диапазон возможных применений во всем спектре электромагнитных волн в том числе, например, при создании совершенных компактных волновых фильтров, новых видов болометров, селективных многочастотных сенсоров [16]. Возможна разработка болометра, который измеряет мощность падающего излучения различных спектральных линий одновременно. Узкополосный отклик предложенных поглотителей делает их идеальными кандидатами для использования в болометрических массивах в астрономии для волн дальнего ИК диапазона. Благодаря безотражательному принципу действия, предложенные поглотители могут быть успешно использованы для стелс-приложений, особенно для неметаллических объектов. В отличие от обычных поглотителей на металлической поверхности, они не увеличивают эффективную площадь рассеяния скрытого объекта за пределами полосы поглощения [16].

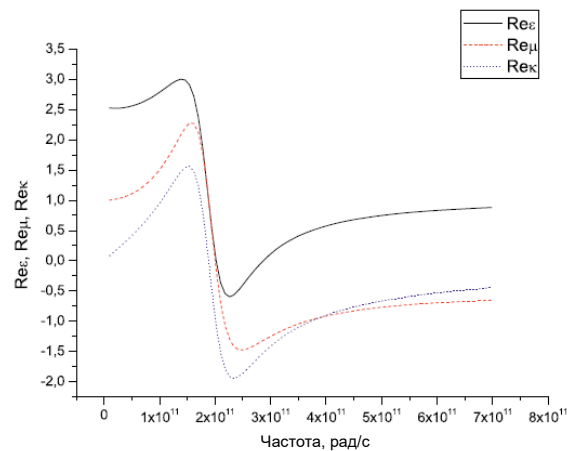


Рисунок 1.7 – Частотные зависимости действительных частей диэлектрической проницаемости ϵ , магнитной проницаемости μ и параметра киральности κ к моделируемым образцам метаматериалов из одновитковых спиральных элементов [28]

Анализ рисунка 1.7 позволяет заключить, что на определенной частоте вблизи резонансной частоты можно реализовать предсказанные эффективные параметры и создать киральный метаматериал с единичным отрицательным показателем преломления [28].

За последние пять лет три сотрудника лаборатории А.П. Балмаков (2013, руководитель с белорусской стороны – И.В. Семченко, с японской – профессор М. Нагату), И.А. Фаняев (2017, руководитель с белорусской стороны –

И.В. Семченко, с японской – профессор В. Мизейкис), С.Д. Барсуков (2018, руководитель с белорусской стороны – С.А. Хахомов, с японской – профессор Д. Кондох) в рамках программы получения двойной ученой степени защитили диссертации на соискание степени PhD (Philosophy Doctor) в области физики в университете Шизуока, Япония (рисунки 1.8–1.10) и один – В.С. Асадчий – в университете Аалто, Финляндия (2017, руководитель с белорусской стороны – И.В. Семченко, с финской – профессор С.А. Третьяков, рисунок 1.11).



Рисунок 1.8 – А.П. Балмаков во время защиты диссертации в университете Шизуока, Япония (2013)



Рисунок 1.9 – И.А. Фаняев во время защиты диссертации в университете Шизуока, Япония (2017)



Рисунок 1.10 – С.Д. Барсуков во время защиты диссертации в университете Шизуока, Япония (2018)

Всего за время существования лаборатории её сотрудниками защищены 1 докторская и 5 кандидатских диссертаций, получено более 10 патентов на изобретения, полезные модели, промышленные образцы.



Рисунок 1.11 – В.С. Асадчий (крайний слева) во время защиты диссертации в университете Аалто, Финляндия (2017)

Необходимо отметить, что для создания образцов спирально структурированных материалов с параметрами, оптимальными для работы в терагерцовом диапазоне, весьма перспективен разработанный в Институте физики полупроводников Сибирского отделения Российской Академии наук (ИФП СО РАН) метод наноструктурирования, называемый Принц-технологией. Данный метод формирования трёхмерных микро- и наноструктур состоит в отделении напряжённой полупроводниковой плёнки от подложки и последующем сворачивании её в пространственный объект. Предложенный в 1995 году В.Я. Принцем, работающим в ИФП СО РАН, метод применяется в научных лабораториях всех развитых стран (США, Японии, Германии и др.), но только в ИФП СО РАН и ГГУ им. Ф. Скорины его используют для формирования спирально-структурированных массивов электромагнитных резонаторов и метаматериалов, см. рисунки 1.12, 1.13 [29]–[33], [22].

В рамках разработанной в ИФП СО РАН технологии возможно масштабирование размеров спиральных элементов (диаметр спиральных элементов – от единиц до сотен микрометров – и их длина – вплоть до нескольких нанометров – обеспечиваются литографически). Следовательно, можно контролируемо варьировать резонансные свойства киральных метаматериалов на основе спиральных элементов в широком диапазоне (от СВЧ до оптического). Такие метаматериалы перспективны для создания функциональных устройств, предназначенных для управления поляризацией, интенсивностью и другими параметрами излучения [32], [33].

В лабораторных условиях экономически целесообразно и удобнее проводить модельные эксперименты в СВЧ-диапазоне на массивах из проволочных спиральных элементов, поскольку из них легко конструировать трёхмерные массивы различной конфигурации: закреплять на радиопрозрачной подложке, ориентировать необходимым образом в радиопрозрачной матрице и т. п.

Полученные на массивах проволочных модельных спиральных элементов результаты могут быть распространены на спиральные элементы из металл-полупроводниковых пленок той же геометрии с толщинами металлических слоев, существенно превышающими толщину скин-слоя как и в СВЧ-диапазоне [32], [33].

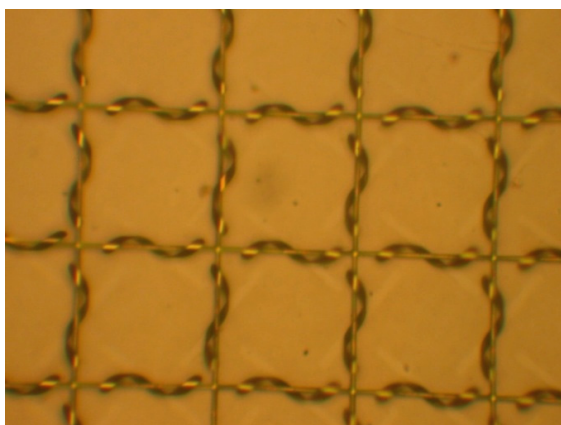


Рисунок 1.12 – Фотография метаматериала, реализованного по расчетам ГГУ им. Ф. Скорины в ИФП СО РАН в форме сетки с квадратными ячейками. Квадратная сетка – негативный фоторезист из полимерного материала толщиной около 1 мкм [32]

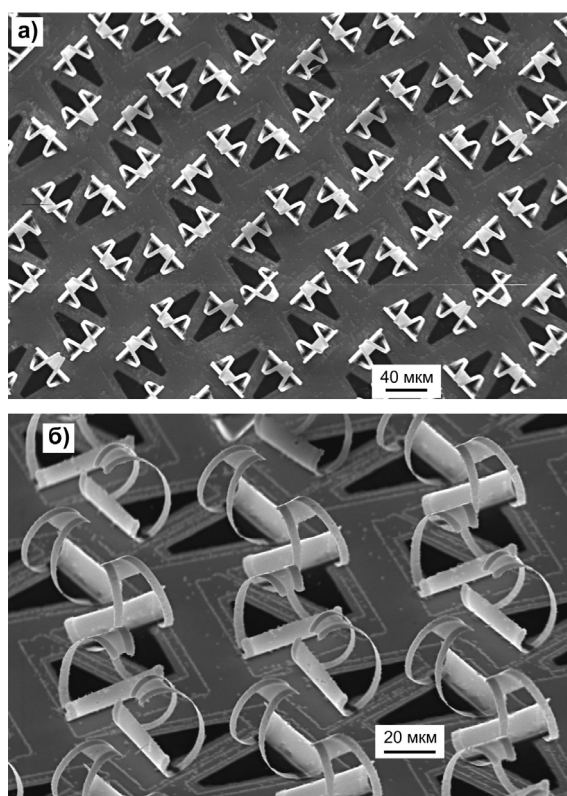


Рисунок 1.13 – СЭМ-изображение метаматериала, образованного одновитковыми спиралями на основе плёнки из $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ti}/\text{Au}$ в ИФП СО РАН; а) вид сверху; б) вид под углом [33]

Наибольшую потребность в киральных метаматериалах испытывают разработчики устройств терагерцового и ИК диапазона, где проблема трансформации поляризации очень актуальна из-за отсутствия соответствующих эффективных фазовых пластинок (даже полуволновых). В последние годы наряду с ИФП СО РАН лабораторией налажено тесное сотрудничество с ОАО «ИНТЕГРАЛ». Для метаматериалов ТГц диапазона искусственные элементы-резонаторы должны иметь характерные размеры порядка единиц – десятков микрометров, чтобы оставаться существенно меньшими длины волны электромагнитного излучения. Для получения согласованного отклика все резонаторы огромного массива должны быть очень точно настроены. Из широко применяемых технологий требуемые размеры и точность обеспечивает традиционная планарная технология, которая позволяет формировать плоские элементы и их слои. Образцы таких метаматериалов по расчетам ГГУ им. Ф. Скорины изготовлены в ОАО «ИНТЕГРАЛ» (рисунок 1.14, [25])

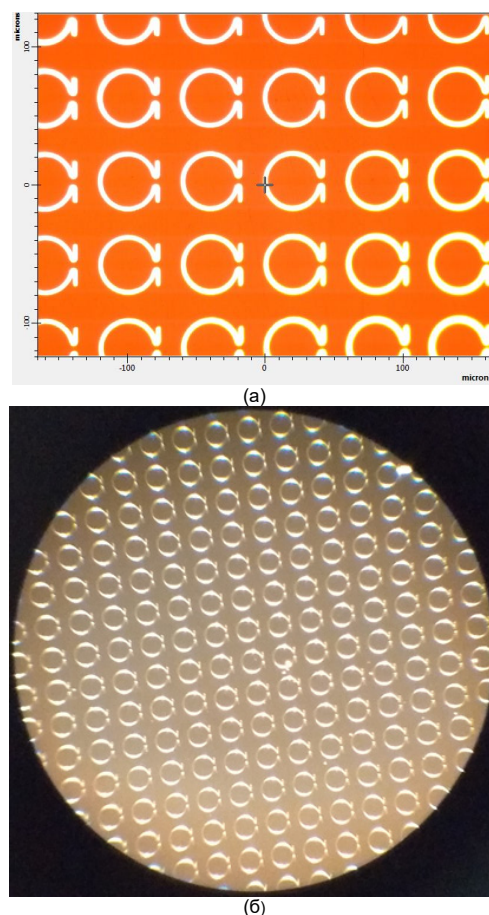


Рисунок 1.14 – Фотошаблон (а) и фотография образца метаматериала (б), образованного омега-подобными элементами, изготовленного ОАО «ИНТЕГРАЛ» (увеличение 200x) [25]

Создание трехмерного структурированного объемного материала довольно тяжело и дорого.

Метасурfaces, представляющие собой упорядоченные специальным образом в пространстве двумерные массивы частиц (омега-элементов), размеры которых много меньше длины волны возбуждающего излучения, являются интересным и важным объектом исследования из-за возможностей более простых способов изготовления (не только нанолитографии, но и, например, химических способов получения двумерных объектов) (рисунок 1.15).

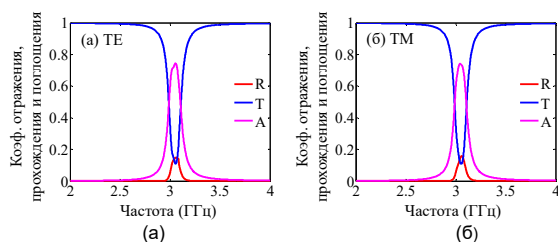


Рисунок 1.15 – Коэффициенты отражения R , прохождения T и поглощения A метаматериала на основе сбалансированных прямоугольных Ω -резонаторов с оптимизированными структурными параметрами для TE (а) и TM (б) волн при нормальном падении

Исследование наблюдаемых в природе биологических фотонных объектов с подходящими свойствами для эффективного контроля отражения света и рассмотрение возможности разработки на основе указанных многослойных фотонных структур перестраиваемых селективных датчиков излучения также представляет значительный научный интерес (рисунок 1.16, [34]).

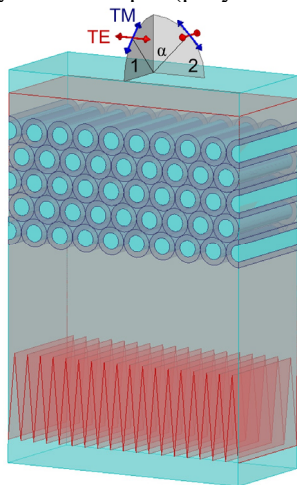


Рисунок 1.16 – Двумерный фотонный кристалл, формирующий структурное цветообразование в перьях некоторых птиц. Общий вид фотонного кристалла, на который падает свет под углом α с поляризациями TE или TM

Сотрудниками лаборатории определен тип фотонного кристалла, ответственного за структурное цветообразование в перьях некоторых птиц, определены материальные параметры для всех составляющих фотонного кристалла.

Рассмотрены основные физические механизмы формирования отражения многослойными системами, которые в некотором приближении могут использоваться для определения отражающей способности фотонного кристалла [34].

2 Проблемная научно-исследовательская лаборатория перспективных материалов

Проблемная научно-исследовательская лаборатория (ПНИЛ) создана 1 октября 1980 г. на основании распоряжения Совета Министров республики от 22 июля 1980 года № 591 и приказа Минвуза от 22 августа 1980 года № 495 в целях широкого привлечения профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов университета к исследованиям в рамках актуальных научных направлений. Первоначально лаборатория занималась исследованиями физико-химической механики процессов трения. Первым научным руководителем лаборатории был академик, доктор физико-математических наук, профессор Б.В. Бокуть, являвшийся в то время также ректором ГГУ. Ученые лаборатории разработали ряд экспериментальных приборов для исследования свойств покрытий материалов, диагностики и активного контроля различных машин, технологических процессов. Под руководством доктора технических наук, профессора И.М. Мельниченко (с 1988 по 2001 г.) лаборатория получила новое научное направление: создание перспективных материалов на базе золь-гель технологии. На сегодняшний день Проблемной научно-исследовательской лабораторией перспективных материалов (ПНИЛ ПМ) накоплен значительный опыт в области высоких технологий получения новых материалов и изделий на базе золь-гель технологий: покрытий, кварцевых стекол, керамики, композитов, абразивного инструмента и др. (рисунок 2.1–2.3) [35]–[39].

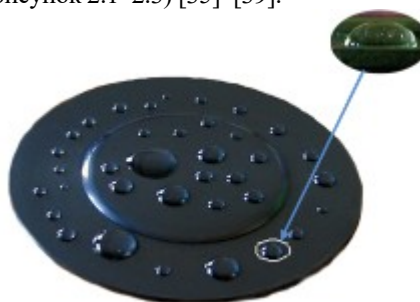


Рисунок 2.1 – Пленкообразующий раствор для формирования золь-гель гидрофобных, просветляющих покрытий на поверхности очковых линз и оптических элементах

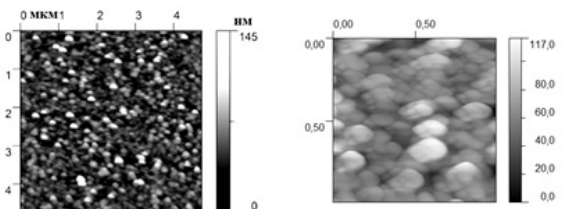
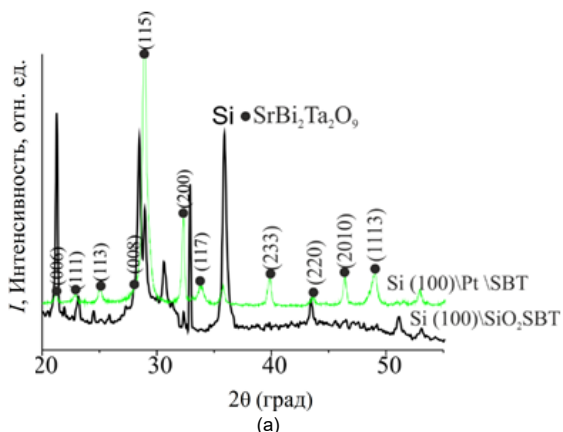
Учеными лаборатории установлена взаимосвязь структуры и сегнетоэлектрических свойств наноструктурированных $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ и $\text{SrBi}_2(\text{Ta}_x\text{Nb}_{1-x})_2\text{O}_9$ (SBT и SBTN) в зависимости от химического состава золя и параметров золь-гель процесса (рисунок 2.4)



Рисунок 2.2 – Пеностекло на основе аэросила технического (отходов Гомельского химзавода) в виде легких и теплых строительных блоков



Рисунок 2.3 – Абразивный шлифовальный инструмент повышенной стойкости на керамической связке из первичного и вторичного абразива



Si(100)\Pt\SBT

Si(100)\SiO₂\SBT

Рисунок 2.4 – Рентгенограммы SBT-плёнок (а) и АСМ-изображения SBT-плёнок (б) [39]

Проводимые научные исследования направлены на создание принципиально новых наукоемких конкурентоспособных материалов и технологий в рамках приоритетных для Республики Беларусь научных направлений. В настоящее

время руководителем лаборатории является ученик И.М. Мельниченко кандидат физико-математических наук В.Е. Гайшун.

За время существования лаборатории её сотрудниками защищены 4 докторские и 9 кандидатских диссертаций, получено более 80 свидетельств на изобретения, патенты и промышленные образцы. Разработки ПНИЛ ПМ отмечены дипломами и медалями международных выставок, внедрены в производство на десятках предприятий Беларуси и Российской Федерации.

С целью проведения более глубокого изучения разрабатываемых в ПНИЛ ПМ материалов и обмена опытом заключены договора о научно-техническом сотрудничестве с целым рядом научно-исследовательских организаций России, Украины, Мексики, Польши, Кореи.

3 Польско-белорусская научная лаборатория золь-гель материалов и технологий

В 2016 году создана совместная польско-белорусская научная лаборатория золь-гель материалов и технологий на базе Института низких температур и структурных исследований Польской академии наук (город Вроцлав) и Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины. Эта лаборатория с 2017 года выполняет международный проект



(TRANSition metal oxides with metastable phases: a way to ward superior FERRoic properties) [40] в рамках грантовой программы Европейского Союза Horizon 2020.

Проект TransFerr предполагает научное сотрудничество ученых из разных стран с целью синтеза ферритов (в том числе для метаматериалов) различными способами, исследования магнитных и других свойств полученных материалов, поиска областей их возможного применения. Предполагается, что ученые из различных научных организаций (Институт низких температур и структурных исследований, г. Вроцлав, Польша; Вильнюсский университет, Вильнюс, Литва; Университет Авейро, г. Авейро, Португалия; Центр Гельмгольца по материаловедению и прибрежным исследованиям, г. Геестхаст, Федеративная Республика Германия; ОАО «Нанокерамика», г. Вроцлав, Польша; Институт физики НАН Украины, г. Киев, Украина; Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, г. Гомель, Беларусь; НПЦ по материаловедению НАН Беларуси, Минск, Беларусь) смогут проявить свои сильные стороны и одновременно использовать достижения коллег из других стран для быстрого и максимально полного прогресса желаемого результата.

4 Научно-исследовательская лаборатория «Физикохимия и технологии микро- и наноразмерных систем»

Научно-исследовательская лаборатория «Физикохимия и технологии микро- и наноразмерных систем» была создана приказом ректора Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины в 2005 г. Заведующим НИЛ «Физикохимия и технологии микро- и наноразмерных систем» является к.ф.-м.н., доцент Н.Н. Федосенко, научным руководителем – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор химических наук, профессор А.В. Рогачев.

Основной целью НИЛ являются проведение исследований, направленных на разработку высокоэффективных технологических процессов напыления диэлектрических, металлических, полимерных и полупроводниковых материалов, стимулированных лазерным излучением в вакууме; разработку физико-химических основ формирования тонких пленок с требуемыми и управляемыми физическими свойствами и изучение влияния условий осаждения, структуры и фазового состава пленки, природы подложки на физико-технические свойства тонкопленочных систем различного функционального назначения в области микро- и нанoeлектроники; совершенствование и развитие методов ионно-лучевых, ионно-плазменных, корпускулярно-фотонных технологий с целью создания высокотехнологичных и конкурентно способных вакуумных установок указанного типа [41]–[47].

5 Китайско-белорусская научная лаборатория по вакуумно-плазменным технологиям

13 июня 2012 года на базе Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины, а 28 сентября 2012 года в Нанкинском университете науки и технологии открыта международная китайско-белорусская научная лаборатория по вакуумно-плазменным технологиям. Научным руководителем лаборатории является член-корреспондент НАН Беларуси, профессор А.В. Рогачев. В последующие годы совместно с вышеуказанным университетом выполнены проекты «Разработка методов формирования и исследование свойств нанокomпозиционных, легированных органических и неорганических покрытий из активной газовой фазы» и «Формирование плазменными и ионно-лучевыми методами покрытий сложного состава на основе углерода и нитридов металлов, изучение их свойств».

На протяжении последних пяти лет лабораторией «Физикохимия и технологии микро- и наноразмерных систем» и китайско-белорусской научной лабораторией по вакуумно-плазменным технологиям разработано и поставлено в КНР научное оборудование, вакуумные установки на сумму превышающую 360 тыс. долларов США (рисунки 5.1, 5.2).



Рисунок 5.1 – Вакуумная установка для нанесения углеродных покрытий методом импульсного катодно-дугового распыления (2013)



Рисунок 5.2 – Вакуумная установка для нанесения полимерных нанокomпозиционных покрытий из газовой фазы методом электронно-лучевого диспергирования (2017)

Ученые лаборатории разработали способ нанесения покрытия с антибактериальным действием на медицинское изделие на основе высокомолекулярного соединения [48], а также покрытие, которое в контакте с живыми тканями распадается без ущерба для здоровья человека. При этом в зону контакта непрерывно поступают соединения, которые оказывают антибактериальное действие. В состав покрытия могут быть введены соединения, способствующие росту костей. Получено разрешение на их применение в медицинской практике. Совместно с коллегами из Нанкинского университета науки и технологии (Китай) разработана вакуумная технология нанесения антибактериальных покрытий на изделия медицинского назначения. Антибактериальное покрытие предназначено для различных изделий медицинского назначения: металлических имплантов, зубных протезов, ортодонтических винтов, хирургических фиксаторов и сеток, титановых пластин, марлевых повязок и т. д. (рисунок 5.3).

Новая технология позволяет обеспечить пролонгированное действие антимикробных препаратов и предотвращает появление и развитие местных и генерализованных инфекций.



Рисунок 5.3 – Изделия медицинского назначения для антибактериального покрытия

Была успешно внедрена в производство разработка нанесения нанокomпозиционных многослойных углеродных покрытий на поверхности машиностроительных деталей (рисунок 5.4), что позволило значительно улучшить их технологические характеристики и увеличить сроки эксплуатации.

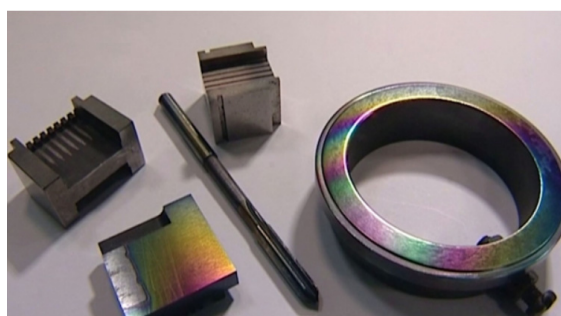


Рисунок 5.4 – Углеродное покрытие на поверхности машиностроительных деталей

Изучено влияние ионного ассистирования на морфологию, фазовый состав, микротвердость и триботехнические свойства углеродных покрытий [49]. Микротвердость углеродных покрытий, сформированных в условиях ассистирования ионами аргона, на 10% выше, чем исходных (рисунок 5.5).

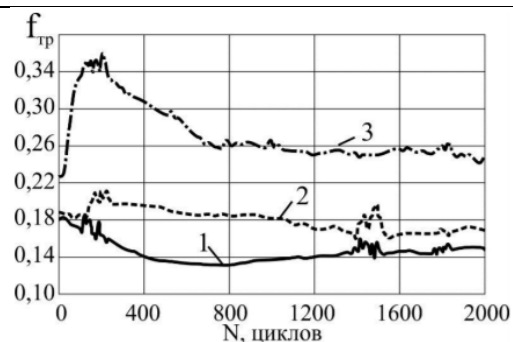


Рисунок 5.5 – Кинетические зависимости коэффициента трения углеродных покрытий, сформированных в отсутствие (1) и в условиях ассистирования ионами Ar^+ (2) и N^+ (3)[49]

В 2013 году после обучения в аспирантуре ГГУ им. Ф. Скорины под руководством А.В. Рогачева успешно защищены кандидатские диссертации по специальности «физика конденсированного состояния» соискателями из Китая Ли Чжубо (Liu Zhubo) и Чжоу Бином (Zhou Bing).



Рисунок 5.6 – Соискатели из Китая Ли Чжубо (слева) и Чжоу Бин (справа)

В 2011 году и 2013 году в университете Шизуока, Япония сотрудниками лаборатории «Физикохимия и технологии микро- и наноразмерных систем» и китайско-белорусской научной лаборатории по вакуумно-плазменным технологиям И. Рязановым (руководитель с белорусской стороны – В.П. Казаченко, с японской – профессор Т. Миено) и Р. Бекаревичем (руководитель с белорусской стороны – А.В. Рогачев, с японской – профессор М. Нагатсу) защищены диссертации на соискание степени PhD (Philosophy Doctor) в области физики.

Всего за время существования лаборатории её сотрудниками защищены 1 докторская и 5 кандидатских диссертаций, получено более 10 свидетельств на изобретения, патенты и промышленные образцы. В настоящее время в советах по защите диссертаций находятся 1 кандидатская и 1 докторская работы.



Рисунок 5.7 – И. Рязанов во время защиты диссертации в университете Шизуока, Япония (2011)



Рисунок 5.8 – Р. Бекаревич во время защиты диссертации в университете Шизуока, Япония (2013)

11–13 июня 2018 года в ГГУ им. Ф. Скорины с участием китайских партнеров состоялся белорусско-китайский научно-технический семинар по результатам проводимых совместно белорусскими и китайскими учеными исследований (рисунки 5.9, 5.10), [50].

В рамках белорусско-китайской программы совместных исследований в ГГУ им. Ф. Скорины в 2017–2019 гг. выполняются следующие проекты:

– «Фундаментальное исследование и проектирование высокочувствительных оптических датчиков на основе многослойных микроструктур метаматериалов» (№ Ф18КИ-027, научный руководитель С.А. Хахомов, совместно с Цзянаньским университетом, Jiangnan University);

– «Разработка двустороннего «идеального» поглотителя СВЧ и ТГц волн на основе метаматериалов и металлополимерных полидисперсных слоев» (№ Ф18КИ-028, научный руководитель И.В. Семченко, совместно с Нанкинским университетом науки и технологии, Nanjing University of Science and Technology);

– «Плазмохимический синтез и исследование структуры и физико-химических свойств нанокomпозиционных градиентных, мозаичных покрытий на основе аморфного углерода и металлов для узлов трения» (№ Т18КИ-008, научный руководитель А.В. Рогачев, совместно с Тайюаньским техническим университетом, Taiwan University of Technology).



Рисунок 5.9 – Участники белорусско-китайского научно-технического семинара (11–13 июня 2018 г.)



Рисунок 5.10 – Участники белорусско-китайского научно-технического семинара (11–13 июня 2018 г.)

Заключение

Таким образом, на основе вышеописанного можно сделать вывод, что исследования по фундаментальным и прикладным аспектам современного материаловедения, физике нано- и метаматериалов, технологии нанесения покрытий в Гомельском государственном университете имени Франциска Скорины развиваются активно и результативно.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Белый, В.А.* Адгезия полимеров к металлам / В.А. Белый, Н.И.Егоренков, Ю.М. Плещачевский. – Минск: Наука и техника, 1971. – 288 с.
2. *Трение полимеров* / В.А. Белый, А.И. Свириденко, М.И. Петроковец, В.Г. Савкин. – М.: Наука, 1972. – 202 с.
3. *Бокуть, Б.В.* Основы теоретической кристаллооптики / Б.В. Бокуть, А.Н. Сердюков. – Гомель: Изд-во Гомельского ун-та, 1977. – Ч. 1. – 90 с., Ч. 2. – 70 с.
4. *Микро- и нанокomпозиционные полимерные покрытия, осаждаемые из активной газовой фазы* / М.А. Ярмоленко, А.А. Рогачев, П.А. Лучников, А.В. Рогачев, Джанг Сянь Хун. – М.: Радиотехника, 2016. – 424 с.
5. *Electromagnetics of bi-anisotropic materials* / A.N. Serdyukov, I.V. Semchenko, S.A. Tretyakov, A.H. Sihvola. – New York: Gordon and Breach Science Publishers, 2001. – 337 p.
6. *Митюрин, Г.С.* Фотоакустический эффект в оптически активных средах / Г.С. Митюрин // Докл. АН БССР. – 1982. – Т. 26, № 5. – С. 414–417.
7. *Лин, Д.Г.* Влияние антиоксидантов на окисление полиэтилена, катализируемое медью / Д.Г. Лин, Е.В. Воробьева // Химическая технология. Изв. вузов. – 2005. – Т. 48, № 12. – С. 61–65.
8. *Состав для получения токопроводящей пленки на кремнеземсодержащей подложке*: пат. 2169406 РФ / И.И. Проневич, Е.Н. Подденежный, И.М. Мельниченко; дата публ.: 15.04.1997.
9. *Стабилизирующая добавка для абразивных суспензий на основе оксида алюминия для шлифовки пластин монокристаллического кремния*: пат. 10513 РБ / Я.А. Косенок, О.И. Тюленкова,

В.Е. Гайшун, И.М. Мельниченко; дата публ.: 30.04.2008.

10. *Всенаправленная бифилярная спиральная антенна с круговой поляризацией излучения* / С.Д. Барсуков, А.С. Побяха, А.П. Балмаков, И.А. Фаняев, Т.А. Державская, И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов, С.Б. Глыбовский, П.А. Белов // *Антенны*. – 2017. – № 3. – С. 43–48.

11. *Экспериментальные исследования направленной антенны на основе спиральных элементов* / С.Д. Барсуков, А.П. Балмаков, И.В. Семченко, С.А. Хахомов, Т.А. Державская, А.П. Слобожанюк, А.Е. Краснок, П.А. Белов // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2014. – № 3 (20). – С. 16–20.

12. *Поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе полимерных композитов и киральных структур* / Сонгсонг Цянь, В.А. Банний, А.Л. Самофалов, И.В. Семченко, С.А. Хахомов // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2014. – № 4 (21). – С. 40–45.

13. *Мизгайлов, В.Н.* Исследование плоских конструкций радиологических антенн / В.Н. Мизгайлов, Б.А. Верига, Н.И. Вяхирев // *Научные технологии*. – 2007. – Т. 8, № 8. – С. 12–14.

14. *Добровольский, И.Ф.* Дополнительные разделы теории излучающих систем / И.Ф. Добровольский. – Гомель: Гомельский государственный университет, 1980. – 47 с.

15. *Семченко, И.В.* Объемные акустические волны в кристаллах во вращающемся электрическом поле: монография / И.В. Семченко, С.А. Хахомов. – Минск: Беларуская навука, 1998. – 150 с.

16. *Broadband Reflectionless Metasheets: Frequency-Selective Transmission and Perfect Absorption* / V.S. Asadchy, I.A. Faniayeu, Y. Ra'di, S.A. Khakhomov, I.V. Semchenko, S.A. Tretyakov // *Phys. Rev. X*. – 2015. – Vol. 5, № 3. – P. 031005-1–031005-10.

17. *Stored and absorbed energy of fields in lossy chiral single-component metamaterials* / I.V. Semchenko, A.P. Balmakou, S.A. Khakhomov, S.A. Tretyakov // *Phys. Rev. B*. – 2018. – Vol. 97. – P. 014432.

18. *Ground-plane-less bidirectional terahertz absorber based on omega resonators* / A.P. Balmakou, M.A. Podalov, S.A. Khakhomov, D.G. Stavenga, I.V. Semchenko // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40, № 9. – P. 2084–2087.

19. *Semchenko, I.V.* Artificial uniaxial bi-anisotropic media at oblique incidence of electromagnetic waves / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov // *Electromagnetics*. – 2002. – Vol. 22, № 1. – P. 71–84.

20. *Semchenko, I.V.* Microwave analogy of optical properties of cholesteric liquid crystals with local chirality under normal incidence of waves / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, S.A. Tretyakov, A.H. Sihvola // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1999. – Vol. 32, № 24. – P. 3222–3226.

21. *Tretyakov, S.A.* Reply to comment on “Reflection and transmission by a uniaxial bi-anisotropic slab

under normal incidence of plane waves” / S.A. Tretyakov, A.H. Sihvola, I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1999. – Vol. 32, № 20. – P. 2705–2706.

22. *Investigation of electromagnetic properties of a high absorptive, weakly reflective metamaterial-substrate system with compensated chirality* / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, V.S. Asadchy, S.V. Golod, E.V. Naumova, V.Ya. Prinz, A.M. Goncharenko, G.V. Sinitsyn, A.V. Lyakhnovich, V.L. Malovich // *Journal of Applied Physics*. – 2017. – Vol. 121. – P. 015108-1–015108-8.

23. *Highly transparent twist polarizer metasurface* / I.A. Faniayeu, S.A. Khakhomov, I.V. Semchenko, V.L. Mizeikis // *Appl. Phys. Lett.* – 2017. – Vol. 111. – P. 111108.

24. *The effective optimal parameters of metamaterial on the base of omega-elements* / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov, M.A. Podalov, Q. Songsong // *Recent Global Research and Education: Technological Challenges*; Ed. by R. Jablonski and R. Szweczyk. – *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – Springer. – 2017. – Vol. 519. – P. 3–9.

25. *Omega-Structured Substrate-Supported Metamaterial for the Transformation of Wave Polarization in THz Frequency Range* / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov, M.A. Podalov, V.A. Solodukha, A.N. Pyatlitski, N.S. Kovalchuk // *Recent Advances in Technology Research and Education. INTER-ACADEMIA 2017*; Ed. by D. Luca [et al.]. – *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – Springer. – 2018. – Vol. 660. – P. 72–80.

26. *Semchenko, I.V.* Research on chiral and bianisotropic media in Byelorussia and Russia in the last ten years / I.V. Semchenko, S.A. Tretyakov, A.N. Serdyukov // *Progress In Electromagnetics Research 12*; Chief Editor: J.A. Kong. – EMW Publishing, Cambridge, Massachusetts. – 1996. – P. 335–370.

27. *Семченко, И.В.* Поляризационная селективность искусственных анизотропных структур на основе ДНК подобных спиралей / И.В. Семченко, А.П. Балмаков, С.А. Хахомов // *Кристаллография*. – 2010. – Т. 55, № 6. – С. 992–998.

28. *Semchenko, I.V.* Chiral metamaterial with unit negative refraction index / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, S.A. Tretyakov // *The European Physical Journal Applied Physics*. – 2009. – Vol. 46, № 3. – P. 32607-1–32607-4.

29. *Киральные метаматериалы терагерцового диапазона на основе спиралей из металлполупроводниковых нанопленок* / Е.В. Наумова [и др.] // *Автометрия*. – 2009. – Vol. 45, № 4. – С. 12–22.

30. *Free-standing and overgrown InGaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays* / Prinz V.Ya. [et al.] // *Physica E*. – 2000. – Vol. 6, № 1. – P. 828–831.

31. *Структура с киральными электромагнитными свойствами и способ ее изготовления*

(варианты): пат. 2317942 РФ: МПК В82В 3/00 (2006) / Е.В. Наумова, В.Я. Принц; дата публ.: 27.02.2008.

32. *Исследование свойств искусственных анизотропных структур с большой киральностью* / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, Е.В. Наумова, В.Я. Принц, С.В. Голод, В.В. Кубарев // Кристаллография. – 2011. – Т. 56, № 3. – С. 404–411.

33. *Исследование свойств слабоотражающих метаматериалов с компенсированной киральностью* / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, В.С. Асадчий, Е.В. Наумова, В.Я. Принц, С.В. Голод, А.Г. Милехин, А.М. Гончаренко, Г.В. Синицын // Кристаллография. – 2014. – Т. 59, № 4. – С. 544–550.

34. *Numerical parametric investigation of photonic crystals in bird feathers* / А.Р. Balmakou, D.G. Stavenga, S.A. Khakhomov, I.V. Semchenko // Proc. of Belarusian and Chinese scientific and technical seminar. – 2018. – P. 4–7.

35. *Hydrated phosphorus oxyacids alone and adsorbed on nanosilica* / V.M. Gun'ko, L.P. Morozova, A.A. Turova, A.V. Turov, V.E. Gaishun, V.M. Bogatyrev, V.V. Turov // Journal of Colloid and Interface Science. – 2012. – Vol. 368, № (1). – P. 263–272.

36. *Spectroscopic studies of chromium-doped silica sol-gel glasses* / W. Stręk, P.J. Dereń, E. Łukowiak, J. Hanuza, H. Drulis, A. Bednarkiewicz, V. Gaishun // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2001. – Vol. 288, № 1–3. – P. 56–65.

37. *Ferroelectric Properties of Nanostructured SBTN Sol-Gel Layers* / V.V. Sidsky, A.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.N. Morozovska, N.V. Morozovsky, V.V. Kolos, A.S. Turtsevich, A.N. Pyatlitski, Yu.M. Pleskachevsky, S.V. Shil'ko, E.M. Petrokovets // Recent Global Research and Education: Technological Challenges; Ed. by R. Jablonski, R. Szweczyk. – Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer. – 2017. – Vol. 519. – P. 103–108.

38. *Nanostructure and Ferroelectric Properties of Sol-Gel SBTN-Films for Electronic Devices* / S.A. Khakhomov, A.V. Semchenko, V.V. Sidsky, V.E. Gaishun, D. Luca, V.V. Kolos, V.A. Solodukha, A.N. Pyatlitski, N.S. Kovalchuk // Recent Advances in Technology Research and Education. INTER-ACADEMIA 2017; Ed. by D. Luca [et al.]. – Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer. – 2018. – Vol. 660. – P.144–150.

39. *Сидский, В.В.* Получение золь-гель методом наноструктурированных материалов на основе танталата (танталата-ниобата) висмута-стронция для конденсаторных структур: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.08 / В.В. Сидский. – Минск, БГУИР, 2017. – 24 с.

40. TransFerr [Electronic resource]. – Mode of access: <http://transferr.eu/>. – Date of access: 20.03.2018.

41. *Structure and properties of polyaniline nanocomposite coatings containing gold nanoparticles formed by low-energy electron beam deposition* / W. Surui, A.A. Rogachev, M.A. Yarmolenko,

A.V. Rogachev, J. Xiaohong, M.S. Gaur, P.A. Luchnikov, O.V. Galtseva, S.A. Chizhik // Applied Surface Science. – 2018. – № 428. – P.1070–1078.

42. *Nanocomposite coatings for implants protection from microbial colonization: Formation features, structure, and properties* / Qi Chen, A.V. Rogachev, D.V. Tapal'skii, M.A. Yarmolenko, A.A. Rogachev, J. Xiaohong, E.V. Koshanskaya, A.S. Vorontsov // Surface & Coatings Technology. – 2017. – Vol. 315. – P. 350–358.

43. *Chromium-modified a-C films with advanced structural, mechanical and corrosive-resistant characteristics* / Y.M. Miao, J. Xiaohong, D.G. Piliptsov, Z. Yuzhao, A.V. Rogachev, A.S. Rudenkov, A.P. Balmakou // Applied Surface Science. – 2016. – Vol. 379. – P. 424–432.

44. *Features of the formation of nanoparticles based on copper in thin-layer systems* / A.V. Rogachev, Jiang Xiaohong, Liu Xiaoheng, M.A. Yarmolenko, A.A. Rogachev, D.L. Gorbachev, Liu Zhu-bo // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 317. – P. 449–456.

45. *Chemical composition, morphology and optical properties of zinc sulfide coatings deposited by low-energy electron beam evaporation* / A.V. Rogachev, M.A. Yarmolenko, A.A. Rogachev, D.L. Gorbachev, Bing Zhou // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 303. – P. 23–29.

46. *Рогачев, А.А.*, Физико-химия полимерных покрытий, осаждаемых из активной газовой фазы / А.А. Рогачев. – М.: Научный мир, 2014. – 287 с.

47. *Микро- и наноконпозиционные полимерные покрытия, осаждаемые из активной газовой фазы* / М.А. Ярмоленко, А.А. Рогачев, П.А. Лучников, А.В. Рогачев, Сянь Хун Джанг. – М.: Радиотехника, 2016. – 424 с.

48. *Способ нанесения покрытия с антибактериальным действием на медицинское изделие на основе высокомолекулярного соединения*: пат. 13256 РБ / А.В. Рогачев, Д.В. Топальский, М.А. Ярмоленко, А.А. Рогачев, А.И. Козлова; дата публ.: 30.06.2010.

49. *Руденков, А.С.* Структура и свойства ионно-модифицированных, легированных азотом и металлами углеродных покрытий для рабочих поверхностей инструмента: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07 / А.С. Руденков. – Гомель, ИММС НАН Беларуси, 2016. – 23 с.

50. *Белорусско-китайский научно-технический семинар* (2018; Гомель): [материалы]; редкол.: А.В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2018. – 40 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проекты № Ф18КИ-027, № Ф18КИ-028).

Поступила в редакцию 31.07.18.