

**Государственное научное учреждение
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»**

УДК 535.343:535.37

**ЗАМКОВЕЦ
Анатолий Дмитриевич**

**РЕЗОНАНСНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ С ПЛАЗМОННЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ
И СЛОИСТЫМИ СРЕДАМИ**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – Оптика**

Минск, 2022

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт физики имени Б.И. Степанова национальной академии наук Беларуси»

Научный консультант: **Тихомиров Сергей Александрович**,
доктор физико-математических наук, член-корреспондент НАН Беларуси, профессор

Официальные оппоненты: **Маскевич Сергей Александрович**,
доктор физико-математических наук, профессор, директор Международного государственного экологического института им. А.Д.Сахарова Белорусского государственного университета

Зенькевич Эдуард Иосифович,
доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической физики факультета информационных технологий и робототехники Белорусского национального технического университета

Малашкевич Георгий Ефимович,
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник центра «Нелинейная оптика и активированные материалы» ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси.

Оппонирующая организация: **Белорусский государственный университет**

Защита состоится «29» ноября 2022 г. в 14³⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.01 при ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ НАН Беларуси по адресу: 220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68-2; тел. ученого секретаря 270-87-98, e-mail: m.parkhots@dragon.bas-net.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси.

Автореферат разослан «28» октября 2022 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат физ.-мат. наук



М.В. Пархоц

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие науки и техники сопровождается постоянным увеличением объемов используемой и перерабатываемой информации, что, в свою очередь, предъявляет повышенные требования к быстродействию и интегрированности электронных элементов. Становится все труднее обеспечивать высокие стандарты технических характеристик разрабатываемых прогрессивных устройств при использовании для их изготовления традиционных кремниевых технологий. Возрастает потребность в материалах нового поколения для биосенсоров, оптических антенн, нанолазеров и других актуальных применений нанофотоники. Увеличивается спрос на «умные» или «интеллектуальные» материалы, свойства которых могут зависеть от внешнего воздействия. Перспективным вариантом для решения возникающих проблем является использование оптических технологий, в основе которых лежат резонансные взаимодействия электромагнитного излучения с нано- и микроструктурированными средами и их составными элементами.

Плазмонные наноматериалы характеризуются наличием ярко выраженных полос поверхностного резонансного поглощения, которые появляются при оптическом возбуждении коллективных колебаний электронов проводимости, ограниченных поверхностью малой металлической частицы. Многократное усиление интенсивности поля вблизи металлических наноструктур в течение времени жизни плазмонного возбуждения обеспечивает широкие перспективы их практического применения в качестве материалов для нанофотоники и оптоэлектроники, лазерной физики и сенсорики.

Плазмонно-фотонные структуры позволяют объединить в одном устройстве миниатюрность, присущую электронным схемам, и быстродействие, свойственное фотонным системам. Включение наночастиц с плазмонными свойствами в состав функциональных элементов и гибридных материалов, содержащих как неорганические, так и органические компоненты, открывает перспективы создания приборов и устройств нового поколения, параметры которых недостижимы для традиционных планарных технологий.

Значительные достижения в области наноинженерии позволяют создавать наноструктуры с нетривиальной топологией и контролируемым образом изменять их параметры. Появляется возможность эффективного управления функциональными характеристиками компонентов разрабатываемых устройств, благодаря чему удастся перестраивать их рабочий спектральный диапазон, увеличивать чувствительность и избирательность оптического отклика на возбуждение.

Уровень развития экспериментальных и теоретических исследований структур с плазмонными резонансами и субволновой периодичностью

(фотонными запрещенными зонами) в настоящее время является достаточно высоким. Однако остается нерешенной проблема установления механизмов взаимодействия оптического излучения с частично-упорядоченными структурами, содержащими в своем составе плотноупакованные монослои металлических плазмонных наночастиц. Частичная упорядоченность в таких структурах создает условия для проявления коллективных эффектов когерентной природы, связанных с сильными электродинамическими взаимодействиями между металлическими частицами, находящимися на малых расстояниях друг от друга. Спектральные свойства периодических структур, в которых плотноупакованные монослои плазмонных наночастиц разделены диэлектрическими слоями субволновой толщины относительно максимума полосы плазмонного резонанса, в значительной степени могут зависеть от условий проявления межслойной интерференции.

Требуется своего решения задача установления закономерностей проявления эффектов, обусловленных усилением локального поля вблизи поверхности плазмонных наночастиц, и их влияния на спектральные свойства частично-упорядоченных гибридных наноструктур, в которых плазмонные наночастицы контактируют с тонкими органическими пленками. Необходимо также исследовать влияние поглощения в матрице на характеристики полосы плазмонного резонанса, поскольку именно поглощающие матрицы часто используются для практических применений.

Недостаточно исследованной является проблема разработки и создания селективных систем с субволновой периодичностью для терагерцового спектрального диапазона, который весьма перспективен для диагностики материалов и объектов.

Планарные структуры в виде плотноупакованных слоев плазмонных наночастиц, а также многослойные системы, представляющие собой нанослои металлических частиц, граничащие с тонкими слоями диэлектрика или полупроводника, удается достаточно просто получать термическим испарением соответствующих материалов в вакууме. Варьируя конструктивные параметры таких структур, можно придавать создаваемому материалу самые различные качества и свойства.

Плазмонно-фотонные структуры, в том числе гибридные, характеризующиеся наличием как плазмонных резонансов, так и субволновой периодичности, перспективны как основа новых типов функциональных нано- и микроструктурированных материалов различного назначения для оптических, оптоэлектронных и инфокоммуникационных применений.

Настоящая диссертация посвящена разработке такого типа структур и изучению механизмов и закономерностей взаимодействия с ними оптического излучения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами. Основные результаты, положенные в основу настоящей диссертационной работы, были получены при выполнении Республиканских и Государственных программ фундаментальных и ориентированных фундаментальных исследований в рамках тем: «Исследование селективных свойств пространственно-неоднородных структур в ИК области спектра и разработка методов их диагностики» (1991-1995 г.г., № ГР 01.9.10032603), «Исследование влияния структурной организации ансамблей наноразмерных частиц на их оптические свойства» (1996-2000 г.г., № ГР 19963281), «Коллективные взаимодействия и оптические свойства металл-диэлектрических структурно-организованных нанокомпозитов» (2001-2005 г.г., № ГР 20014293), «Разработка моделей и методов исследования планарных металлдиэлектрических самоорганизующихся наноструктур для целей их оптической диагностики» (2006 - 2010 г.г., № ГР 20067040), «Исследование сложных атомно-молекулярных систем и многокомпонентных наноструктур на основе развития методов лазерной спектроскопии сверхвысокого временного и спектрального разрешения, спектрального и люминесцентного анализов в целях разработки и диагностики новых прогрессивных функциональных материалов и соединений для оптоэлектроники, нанофотоники и фармакологии" (2011 – 2013 г.г., № ГР 20110361), «Развитие методов лазерной спектроскопии сверхвысокого временного и спектрального разрешения и их применение для исследования нанокомпозитных структурированных материалов, техногенных загрязнителей атмосферы и биомолекул» (2014 – 2015 г.г., № ГР 20140833), «Исследование полупроводниковых, плазмонных и гибридных наноматериалов, а также сложных органических атомно-молекулярных систем на основе развития методов лазерной спектроскопии сверхвысокого временного и спектрального разрешения для разработки новых лазерно-оптических и биологически активных функциональных материалов» (2016 – 2020 г.г., № ГР 20160047), а также при выполнении проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований: № Ф2000-121 «Резонансные взаимодействия и поверхностные моды в наноструктурах с трансляционной симметрией» (2001-2003 г.г., № ГР 20012994), № Ф07У-007 «Создание на основе π -сопряженных полимеров, активированных металлоорганическими комплексами и нанокристаллами полупроводниковых соединений, активных сред для оптоэлектронных устройств» (2007-2009 г.г., № ГР 20072101), № Ф09-028 «Фемтосекундная динамика электронных возбуждений в плазмонных пространственно-упорядоченных плотноупакованных наноструктурах» (2009-2011 г.г., № ГР 20092276), № Ф10-158 «Влияние поглощения и проводимости

матрицы на коллективные взаимодействия в композитных плазмонных материалах для нанофотоники и оптоэлектроники» (2010-2012 г.г., № ГР 20102648), № Ф11К-065 "Субмикронные периодические структуры на основе фотополлимерных плазмонных нанокомпозитов: динамика оптического отклика на фемтосекундное лазерное возбуждение" (2011-2013 г.г., № ГР 20131444), № Ф12ОБ-054 «Рассеяние и локализация света в двухмасштабных нанопористых и нанокомпозитных структурах» (2012-2014 г.г., № ГР 20122830), № Ф13К-075 «Субмикронные периодические структуры на основе фотополлимерных плазмонных нанокомпозитов: динамика оптического отклика на фемтосекундное лазерное возбуждение» (2013-2015 г.г., № ГР 20131398), № Ф15-092 «Плазмонзависимая модификация спектрально-кинетических свойств тонкопленочных органических субмикронных структур в присутствии плазмонных наночастиц» (2015-2017 г.г., № ГР 20151364), № Ф16В2-003 «Исследование спектрально-кинетических свойств сверхбыстрого нелинейного оптического отклика наноструктурированных композитных материалов на основе развития методов фемтосекундной кинетической спектроскопии» (2016-2017 г.г., № ГР 20160774), № Ф19ВА-003 «Влияние анизотропии плазмонных нанокомпозитов на электродинамические взаимодействия, эффекты ближнего поля и спектрально-кинетические характеристики гибридных наноструктур» (2019-2020 г.г., № ГР 20191752).

Тема диссертации соответствует п.6 «Электроника и фотоника» и п.8 «Многофункциональные материалы и технологии» перечня приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016-2020 годы» (утвержден постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. № 190), а также п.4 перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021-2025 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156).

Цель и задачи исследования. Цель работы состоит в установлении механизмов и закономерностей резонансного взаимодействия оптического излучения с плотноупакованными монослоями плазмонных наночастиц, а также со слоистыми структурами, характеризующимися наличием плазмонных резонансов и субволновой периодичности, как основы новых типов функциональных нано- и микроструктурированных материалов для оптических, оптоэлектронных и инфокоммуникационных применений.

Для достижения данной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Создать с использованием термического испарения в вакууме экспериментальные образцы плотноупакованных монослоев плазмонных металлических наночастиц в различных матрицах, а также многослойных структур, в которых плотноупакованные монослои плазмонных частиц

разделены диэлектрическими слоями различной толщины. Провести экспериментальные исследования влияния конструктивных параметров на наблюдаемые фотонные и электронные коллективные эффекты.

2. Установить механизмы и закономерности межчастичных электродинамических взаимодействий в планарных плазмонных частично-упорядоченных наноструктурах с различным долевым содержанием металлической компоненты, в том числе при наличии поглощения в матрице.

3. Изучить особенности проявления эффектов, обусловленных усилением локального поля вблизи поверхности плазмонных наночастиц, и оценить их влияние на спектральные свойства экспериментально изготовленных частично-упорядоченных наноструктур различного вида и топологии.

4. С использованием методов фемтосекундной спектроскопии изучить спектрально-кинетические свойства плазмонных наноструктур и гибридных систем, в которых плазмонные наночастицы контактируют с тонкими органическими пленками.

5. Экспериментально исследовать возможность управления спектрально-селективными свойствами структур с плазмонными резонансами и субволновой периодичностью, и на их основе разработать новые конструкции спектрально-селективных фильтров для видимого диапазона, а также для терагерцовой области спектра.

Объекты исследования – плотноупакованные монослои плазмонных наночастиц, а также слоистые структуры, характеризующиеся наличием плазмонных резонансов и субволновой периодичности.

Предмет исследования – резонансные взаимодействия оптического излучения с плотноупакованными монослоями плазмонных наночастиц, а также со слоистыми структурами, характеризующимися наличием плазмонных резонансов и субволновой периодичности.

Научная новизна

- Установлено существенное увеличение концентрационного длинноволнового сдвига максимума полосы поверхностного плазмонного резонанса поглощения плотноупакованного монослоя наночастиц серебра по сравнению с отдельными сферическими частицами таких же размеров при увеличении показателя преломления матрицы.

- В максимуме полосы плазмонного поглощения многослойных металлосодержащих наноструктур с четвертьволновыми диэлектрическими прослойками установлено возрастание оптической плотности при увеличении числа плотноупакованных монослоев металлических наночастиц,

превышающее аддитивную величину и определяемое эффектами межслойной интерференции. В таких системах одновременно достигается высокое поглощение и малое отражение в области полосы поверхностного плазмонного резонанса.

- Установлено, что наличие поглощения в фуллереновой матрице приводит к ослаблению 2D электродинамических взаимодействий между металлическими наночастицами в плотноупакованных наноструктурах Au-C₆₀ и Cu-C₆₀. Это проявляется в подавлении концентрационной зависимости спектрального положения максимума полосы поверхностного плазмонного резонанса поглощения.

- Экспериментально установлено, что присутствие наночастиц серебра значительно увеличивает оптическую плотность тонких металлофталоцианиновых пленок в длинноволновом относительно полосы плазмонного резонанса диапазоне. Данный эффект обусловлен усилением локального поля вблизи поверхности плазмонных наночастиц на расстояниях, сравнимых с их размерами.

- Обнаружено усиление поверхностного плазмонного резонанса наночастиц меди в изготовленной термическим испарением в вакууме двухслойной биметаллической системе медь-серебро, связанное с наличием сильных ближнеполевых взаимодействий между наночастицами серебра и меди в условиях высокой локальной неоднородности электромагнитного поля.

- Установлено, что для гибридных наноструктур Ag-CuPc (серебро-фталоцианин меди) регистрируемое быстрорелаксирующее просветление в области длинноволновых полос электронного поглощения CuPc и его динамика обусловлены не изменением населенностей энергетических состояний фталоцианина меди, а изменением состояния электронной подсистемы плазмонных наночастиц в результате их возбуждения фемтосекундными импульсами и последующей термализации электронов в самих наночастицах.

- Эффекты поверхностного плазмонного поглощения и межслойной интерференции, а также наличие в структуре слоев с продольным градиентом поверхностной плотности металла использованы в металлодиэлектрических покрытиях для подавления падающего излучения в широкой спектральной области видимого диапазона при малых значениях коэффициента отражения в области подавления.

- Разработаны новые методы создания многослойных систем с субволновой периодичностью для терагерцового диапазона, включающие использование несимметричных по структуре полимер-кристаллических интерференционных систем с квазиоднородными слоями высокого показателя преломления, а также периодических структур со слоями неравной оптической толщины с высокими значениями параметра неравнотолщинности.

Положения, выносимые на защиту

1. Собственное поглощение фуллереновой матрицы, в которую внедрены плазмонные наночастицы с высокой концентрацией, приводит к ослаблению коллективных электродинамических взаимодействий между ними, что проявляется в подавлении концентрационной зависимости спектрального положения максимума полосы поверхностного плазмонного резонанса поглощения.

2. Увеличение оптической плотности в максимуме полосы поверхностного плазмонного резонанса поглощения слоистых металло-диэлектрических наноструктур при возрастании числа плотноупакованных монослоев плазмонных наночастиц, разделенных четвертьволновыми относительно длины волны максимума плазмонного резонанса диэлектрическими пленками, превышающее ее аддитивную величину, обусловлено деструктивной межслойной интерференцией.

3. Увеличение оптической плотности тонких пленок органических полупроводников, металлофталоцианинов CuPc, NiPc, находящихся в контакте с плотноупакованными слоями наночастиц серебра, обусловлено усилением локального поля вблизи поверхности плазмонных наночастиц на расстояниях, сравнимых с их размерами, и наиболее сильно (до 50% и выше) проявляется в длинноволновом относительно полосы плазмонного резонанса спектральном диапазоне.

4. Совпадение по времени быстрой компоненты кинетики релаксации просветления в области полос поглощения органической компоненты гибридной наноструктуры серебро-фталоцианин меди с кинетикой восстановления поверхностного плазмонного резонанса поглощения наночастиц серебра связано с тем, что данная компонента кинетики обусловлена не изменением населенностей энергетических состояний фталоцианина меди, а изменением состояния электронной подсистемы плазмонных наночастиц в результате их возбуждения фемтосекундными импульсами и последующей быстрой релаксации.

5. Высокая степень подавления излучения в видимом диапазоне (пропускание менее 0.05%) при величине остаточного отражения менее 1% в широкополосных поглощающих антиотражающих покрытиях, созданных с использованием последовательного термического осаждения металла и диэлектрического материала, достигается за счет использования поверхностного плазмонного поглощения и межслойной интерференции, а также наличия в структуре слоев с продольным градиентом поверхностной плотности металла.

6. Новые методы создания отрезающих фильтров для терагерцового

диапазона, включающие:

- использование несимметричных по структуре полимер-кристаллических интерференционных систем с квазиоднородными слоями Ge-LiF высокого показателя преломления, в которых суммарные оптические толщины Ge и суммарные оптические толщины LiF одинаковы во всех слоях, для расширения зон подавления фонового излучения;

- добавление дополнительных нечетвертьволновых слоев из полиэтилена и германия в состав полимер-кристаллической интерференционной системы, формирующей границу отрезания, для повышения пропускания в области вторичных минимумов.

Личный вклад соискателя ученой степени. Представленные в диссертации положения и основные результаты получены лично соискателем при научном консультировании доктора физ.- мат. наук, члена-корреспондента НАН Беларуси, профессора С.А. Тихомирова и при активном сотрудничестве с доктором физ.-мат. наук, доцентом А.Н. Понявиной по моделированию оптических характеристик наночастиц и плазмонных наноструктур, а также сопоставлению результатов эксперимента с теоретическими расчетами. Направление исследований по теме диссертации поддерживалось академиком Н.А. Борисевичем.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задач исследования, изготовлении и исследовании экспериментальных образцов, обобщении и интерпретации экспериментальных результатов, непосредственном участии в написании всех публикаций, участии в планировании теоретических расчетов и их сопоставлении с экспериментом. Измерение и анализ спектров люминесценции наноструктурированных объектов проводились совместно с П.П. Першукевичем. Измерение нестационарных спектров поглощения плазмонных наноструктур с фемтосекундным временным разрешением и обсуждение их особенностей осуществлялось совместно с О.В. Бугановым. Получение металлофуллереновых наноструктур и анализ их свойств выполнены при сотрудничестве с Э.М. Шпилевским. Исследование микроструктуры образцов осуществлялось при сотрудничестве с Л.Н. Баран. Теоретические расчеты проводились С.М. Качан, Р.А. Дыничем, Е.В. Целешем. Остальные соавторы принимали участие в решении отдельных задач, не вошедших в диссертационную работу. Автором выполнялись расчеты спектральных характеристик полимер-кристаллических интерференционных систем для терагерцового диапазона.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Результаты исследований, включенные в диссертацию, были доложены на международных научных конференциях, симпозиумах и съездах:

Ninth International Conference on Solid Films and Surfaces «ICSFS-9» (Copenhagen (Denmark), 1998); 8-й, 9-й, 10-й Международных конференциях по физике и технологии тонких пленок (И.-Франковск (Украина), 2001, 2003, 2005); Международных конгрессах «Фундаментальные проблемы оптики» (С.-Петербург (Россия), 2002, 2004); Международной конференции «Наноразмерные системы. Электронное, атомное строение и свойства» (Киев (Украина), 2004); II межрегиональном семинаре «Нанотехнологии и фотонные кристаллы» (Калуга (Россия), 2004); IV Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (Санкт-Петербург (Россия), 2004); I-й Республиканской научно-практической конференции «Оптика неоднородных структур» (Могилев (Беларусь), 2004); International Scient. and Techn. Conference on Novel Composites Materials» (Sochi (Russia), 2004); Международных научно-практических конференциях по квантовой электронике (Минск (Беларусь), 2008, 2010, 2013, 2015, 2017); Международных научных конференциях «Актуальные проблемы физики твердого тела» (Минск (Беларусь), 2007, 2009, 2011, 2016, 2018); Международных научных конференциях «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск (Беларусь), 2007, 2009, 2017); 3-rd International Scientific and Technical Conference "Sensors Electronics and Microsystems Technology"(SEMST) (Odessa (Ukraine), 2008); Конгрессах физиков Беларуси (Минск (Беларусь), 2008, 2013, 2015, 2017); International conference «Physics, Chemistry and Application of Nanostructures» (Nanomeeting) (Minsk (Belarus) 2003, 2005, 2013, 2015, 2019); I-й и IV-й международной научной конференции «Наноструктурные материалы: Беларусь – Россия-Украина» (Минск (Беларусь), 2008, 2014); III, VI, VIII Международных конференциях «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» (Минск (Беларусь) 2004, 2011, 2014); VII съезде Российского Фотобиологического Общества (п. Шепси (Россия), 2014); V и VI Украинских научных конференциях по физике полупроводников с участием зарубежных специалистов (Ужгород (Украина), 2011), (Черновцы (Украина), 2013); III Международной научной конференции «Наноструктурированные материалы - 2012: Россия - Украина – Беларусь (НАНО-2012) (Петербург (Россия), 2012); XII, XIII and IV International Conference «Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems» ICPTTFN (Iv.-Frankivsk (Ukraine), 2009, 2011, 2013); VIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Судак (Крым, Россия), 2011); International conference ICONO/LAT (Kazan (Russia), 2010); Международной научной конференции «Лазерная Физика и Оптические Технологии» (Минск (Беларусь), 2010); 8-th International Conference on Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials «ICEPOM-8» (Ivano-Frankivsk (Ukraine), 2010); 10-й международной Научно-технической конференции «Вакуумная техника,

материалы и технологии» (Москва (Россия), 2015); 2nd International Conference on Modern Applications of Nanotechnologies (Minsk (Belarus), 2015), 26-th International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology» (Minsk (Belarus), 2018).

Результаты, представленные в диссертации, использованы в ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» и в ГНУ «ИНСТИТУТ ТЕПЛО-И МАССООБМЕНА имени А.В. ЛЫКОВА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ» (информация об использовании имеется в ПРИЛОЖЕНИИ В к диссертации).

Опубликование результатов диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 94 научных работах, среди которых 35 статей в научных рецензируемых журналах, 31 статья в сборниках материалов конференций, 26 тезисов докладов, 2 патента. Общий объем материалов, опубликованных по теме диссертационной работы, составляет 342 страницы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, семи глав, заключения, библиографического списка, 3-х приложений. Полный объем диссертации составляет 250 страниц, включая 141 рисунок (на 57 страницах) и 3 приложения на 6 страницах. Библиографический список, содержащий список использованных источников (333 наименования) и список публикаций соискателя (94 наименования) занимает 32 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Первая глава является обзорной. В ней рассматриваются особенности проявления плазмонного резонанса в металл-диэлектрических системах. Это объемные плазмоны в металлах, плазмон-поляритоны на границе раздела металла и диэлектрика, локализованный поверхностный плазмонный резонанс на металлической частице и коллективный поверхностный плазмонный резонанс в ансамбле металлических наночастиц. Далее рассматриваются слоистые среды с субволновой периодичностью (фотонными запрещенными зонами), экспериментальные методы изготовления и теоретические методы расчета структур с плазмонными резонансами и субволновой периодичностью, динамика электронных возбуждений в металлосодержащих наноструктурах при импульсных лазерных воздействиях. Анализируется современное состояние исследований оптических свойств структур с локализованным поверхностным плазмонным резонансом и слоистых сред с субволновой периодичностью, ставится задача исследования.

Вторая глава является методической. В ней приведены основные сведения, касающиеся использованных методик изготовления и исследования

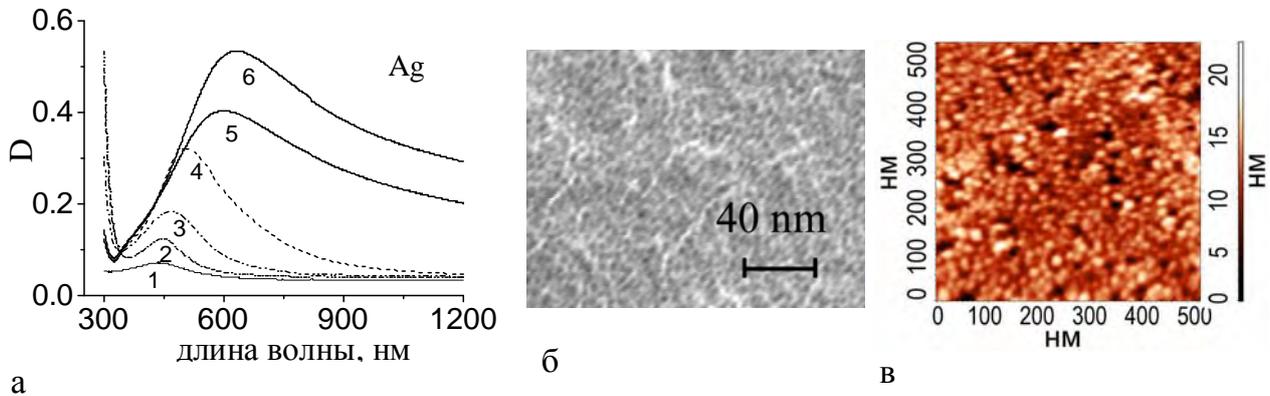
экспериментальных образцов, а также указаны типы использованного оборудования. Экспериментальные образцы изготавливались термическим испарением в вакууме. Контроль толщин осуществлялся кварцевым датчиком. Минимально регистрируемое изменение массы составляло 0.1 мкг/см^2 (1.00 ангстрем при осаждении серебра). Слои для терагерцового диапазона контролировались с использованием фотометрической системы контроля. Погрешность измерения толщин плазмонных нанослоев в процессе изготовления экспериментальных образцов составляла не более 15-20%. Для субволновых пленок погрешность не превышала 10%.

Спектральные характеристики пропускания, отражения и оптической плотности в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах записывались на спектрофотометре «Cary 500» (Varian, США), спектры пропускания и отражения в дальней ИК области 25 - 300 мкм (терагерцовый диапазон) – на спектрофотометре FIS-3 (Hitachi, Япония), а также на Фурье-спектрометре Nexus (Thermo Nicolet, США). Структурная характеристика осуществлялась на электронном микроскопе «Hitachi 800», а также на атомно-силовом микроскопе "Solver P47 - PRO". Измерения спектров люминесценции и спектров возбуждения люминесценции проводились на автоматизированном спектрофлуориметре СДЛ-2, состоящем из светосильного монохроматора возбуждения МДР-12 и монохроматора регистрации МДР-23. Эксперименты по измерению спектрально-кинетических свойств наноструктур проводились с использованием фемтосекундного спектрометра, разработанного в центре «Фотоника атомных и молекулярных структур» ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси. В его основе лежит оригинальный генератор фемтосекундных импульсов на сапфире с титаном.

Третья глава посвящена изучению спектральных свойств плотноупакованных нанослоев наночастиц благородных металлов в контакте с различными диэлектрическими и полупроводниковыми материалами. Значительная часть исследований выполнена с использованием наночастиц серебра, для которого достигается наиболее высокая среди благородных металлов добротность полосы плазмонного резонанса. Представленные на рисунке 1(а) спектры оптической плотности полученных термическим испарением в вакууме островковых пленок серебра, отличающихся величиной поверхностной плотности материала (ППМ), показывают, что увеличение ППМ от $0.83 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^2$ до $7.66 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^2$ приводит к увеличению интенсивности и полуширины полосы поверхностного плазмонного резонанса поглощения (ППРП). При этом возрастает и средний размер наночастиц от $d_{\text{ср}} \sim 5 \text{ нм}$ до $d_{\text{ср}} \sim 15 \text{ нм}$ (рисунки 1(б)-1(в)).

Экспериментально установлено, что плотная упаковка наночастиц Ag в монослое приводит к формированию полосы коллективного ППРП, максимум

которой сдвинут в длинноволновую область спектра относительно полосы локализованного плазмонного резонанса. Этот сдвиг связан с сильными электродинамическими 2D взаимодействиями между металлическими наночастицами, находящимися в условиях плотной упаковки, и его величина возрастает с увеличением ППМ в монослое (рисунок 1(а)).

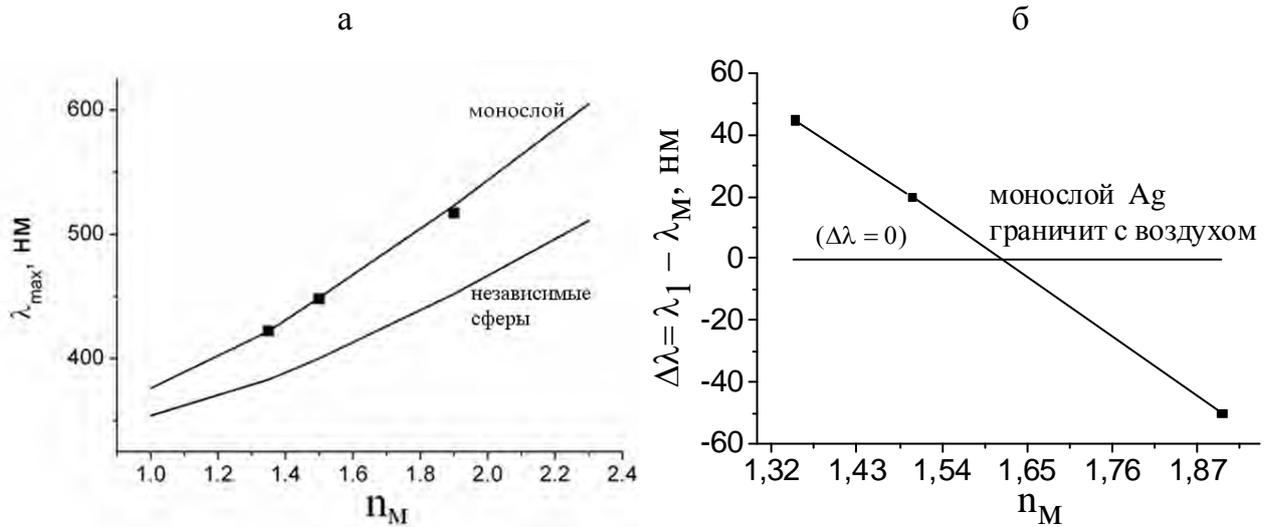


ППМ: 1,2,3,4,5,6 – (0.83; 1.36; 1.89; 4.1; 5.5; 7.66) $\times 10^{-6}$ г/см², соответственно
Рисунок 1. – (а) Экспериментальные спектры оптической плотности
монослоев наночастиц серебра с различной ППМ и (б) электронно-
микроскопический снимок поверхности монослоя серебра
с ППМ $\sim 1,89 \times 10^{-6}$ г/см², (в) АСМ-снимок монослоя серебра
с ППМ $\sim 5.5 \times 10^{-6}$ г/см²

В подразделе 3.1.2 рассматриваются вопросы влияния электродинамических взаимодействий между металлическими наночастицами на характеристики полосы плазмонного резонанса при контактировании плазмонных наночастиц со средними размерами ~ 5 нм базового плотноупакованного монослоя Ag с различными тонкопленочными матрицами. Установлено, что при размещении такого монослоя в диэлектрических тонкопленочных матрицах из материалов с различными показателями преломления наблюдается длинноволновый сдвиг полосы ППРП и близкая к линейной зависимость спектрального положения максимума полосы ППРП от величины показателя преломления матрицы. Наблюдается хорошее соответствие экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов (рисунок 2(а)), выполненных с использованием квазикристаллического приближения (ККП) статистической теории многократного рассеяния волн (СТМРВ). Показано, что для плотноупакованного монослоя Ag, характеризующегося коллективной полосой ППРП, достигается более высокая чувствительность спектрального положения максимума полосы ППРП к изменению показателя преломления окружающей матрицы (порядка 60% и более), по сравнению со структурами аналогичного размера с локализованным резонансом. Такие наноструктуры перспективны

для сенсорных применений.

Установлено также, что направление спектрального смещения максимума полосы ППРП монослоя в матрице (λ_m) относительно ППРП монослоя на подложке, граничащего с воздухом (λ_1), зависит от соотношения показателей преломления подложки и матрицы (рисунок 2(б)). При размещении наночастиц Ag между тонкими пленками из Na_3AlF_6 и KCl наблюдается коротковолновое смещение, в то время как для случая тонких пленок из SiO – длинноволновое смещение полосы ППРП относительно λ_1 . Такой результат может быть связан с различием в изменении степени неоднородности поля, в котором находятся



наносферы: $d=5$ нм; квадратами обозначены данные эксперимента для монослоев Ag с $d_{\text{ср}} \sim 5$ нм, $\eta \sim 0.5$ (η – параметр перекрытия, равный отношению площади подложки, занятой частицами, к общей площади подложки)

Рисунок 2. – (а) Зависимость длины волны λ_{\max} в максимуме полосы ППРП от показателя преломления матрицы для отдельных серебряных наносфер и для самоорганизующихся монослоев на их основе,

(б) зависимость спектрального сдвига $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_m$ монослоя частиц Ag от показателя преломления матрицы

металлические наночастицы вблизи подложки. По-видимому, при увеличении показателя преломления матрицы от 1 до значений n подложки, неоднородность поля, вызванная наличием границы раздела, ослабляется, что соответствует коротковолновому смещению полосы ППРП. В то же время дальнейшее увеличение показателя преломления матрицы (от значений n подложки и выше) вновь восстанавливает существенную неоднородность поля вблизи границы с подложкой, что опять увеличивает вклад мультиполей высоких порядков и приводит к длинноволновому смещению полосы ППРП.

В подразделе 3.1.2 установлено, что из-за достаточно высокой контрастности интерференционной картины в тонкопленочных

полупроводниковых матрицах (ZnS, ZnSe), обусловленной высокими значениями показателей преломления этих материалов ($n \sim 2.4$), полоса ППРП плотноупакованного монослоя наночастиц Ag может маскироваться интерференцией. Особенно актуальной такая ситуация представляется для случаев, когда размеры плазмонных частиц в монослое малы ($d \sim 5$ нм) и интенсивность полосы ППРП невелика. Это следует учитывать при выборе конструктивных параметров металло-полупроводниковых наноструктур.

В разделе 3.2 рассматриваются спектральные характеристики однослойных металлофуллереновых структур (Me-C₆₀), где матрица характеризуется наличием поглощения в видимом диапазоне. На примерах наноструктурированных сред, характеризующихся параметрами перекрытия $\eta < 1$ и толщинами, сравнимыми со средними размерами содержащихся в них металлических наночастиц, продемонстрировано влияние поглощения в матрице на эффективность проявления электродинамических взаимодействий между плазмонными наночастицами. Представлены результаты исследований оптических свойств наноструктур Au - C₆₀, Ag-C₆₀ и Cu-C₆₀, а также их составных компонентов в видимой и ближней ИК областях спектра. Металлофуллереновые наноструктуры изготавливались путем одновременного испарения в вакууме двух материалов.

Для наноструктур Au увеличение ППМ приводит к длинноволновому сдвигу полосы ППРП, что связано с усилением электродинамических 2D взаимодействий в таких структурах. Увеличение долевого содержания металла в гибридной наноструктуре золото-фуллерен при широком диапазоне изменений конструктивных параметров также приводит к длинноволновому сдвигу полосы ППРП. Однако на эксперименте обнаружено, что для некоторого диапазона концентраций при одинаковых изменениях величины поверхностной плотности Au в наноструктуре чистого золота максимум полосы ППРП сдвигается по спектру, а для гибридной структуры – остается на той же длине волны (рисунок 3).

Отсутствие сдвига полосы ППРП имеет место и при проведении теоретических расчетов оптических характеристик монослоев Au в углеродсодержащей матрице для различных значений параметров перекрытия. Расчеты проводились с использованием интерференционного приближения (ИП) СТМРВ. При расчетах в ИП предполагается, что плазмонные частицы находятся только в поле падающей волны и имеет место только интерференция падающего и прошедшего через монослой излучения, а многократным переоблучением (рассеянием) частиц в плоскости монослоя пренебрегают.

Аналогичная закономерность прослеживается и для наноструктур Cu-C₆₀. В этом случае также для определенного диапазона варьирования конструктивных параметров при одинаковых изменениях величины

поверхностной плотности Cu в наноструктурах чистой меди максимум полосы ППРП сдвигается по спектру, а для гибридной структуры – остается на той же длине волны. Отсутствие концентрационного сдвига наблюдается и при расчетах наноструктур Cu-C₆₀ для разных значений параметра перекрытия – полоса ППРП не сдвигается по спектру, а лишь изменяется ее интенсивность (уменьшается пропускание).

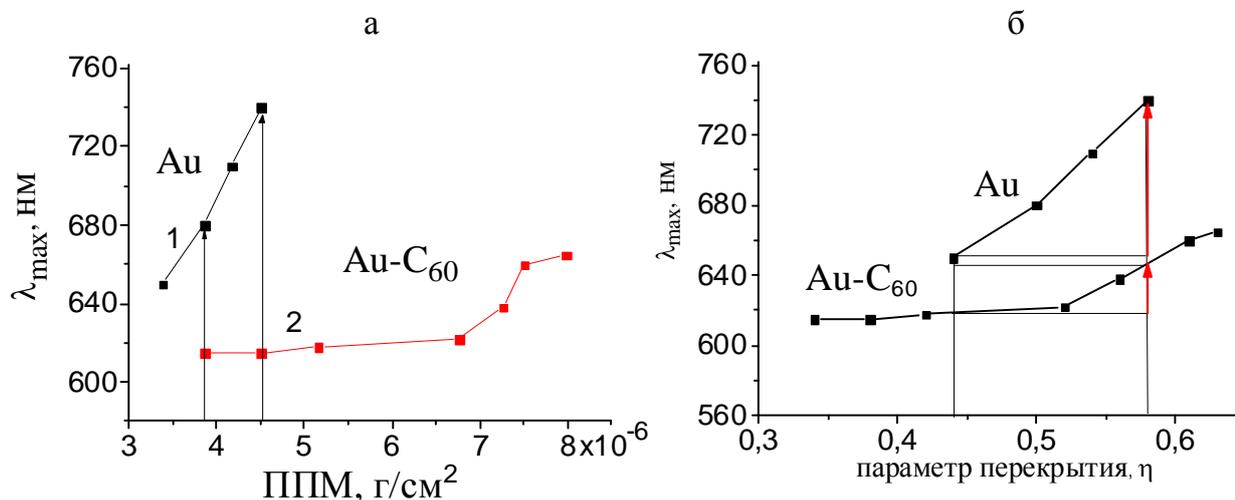


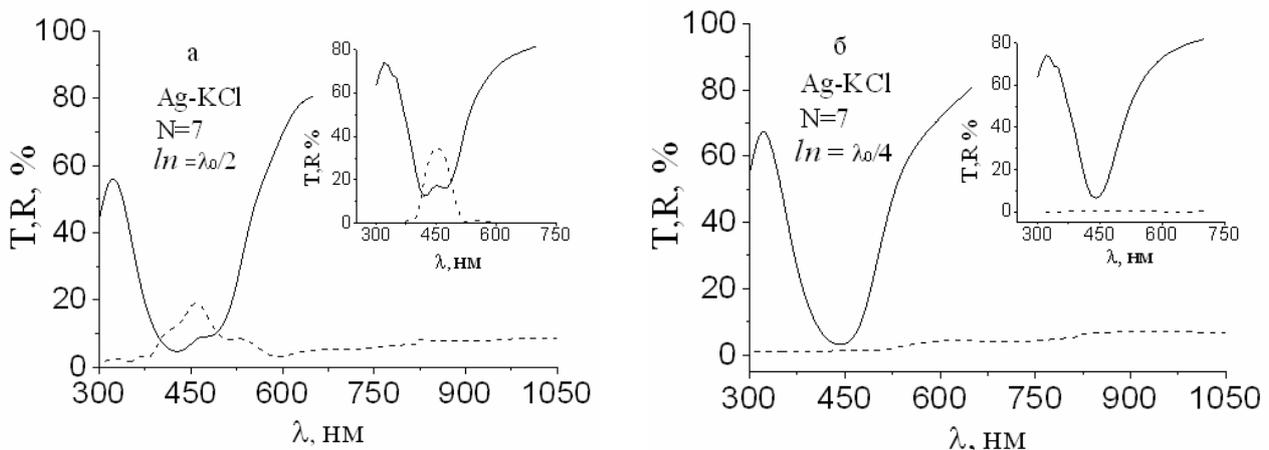
Рисунок 3. – Зависимость длины волны максимума полосы ППРП в наноструктурах Au (1) и Au-C₆₀ (2) от поверхностной плотности Au (а), а также от параметра перекрытия (б)

Сопоставление экспериментальных и теоретических результатов позволяет сделать вывод о том, что подавление концентрационного сдвига в металлофуллереновых наноструктурах связано с ослаблением электродинамических 2D взаимодействий между металлическими наночастицами из-за наличия поглощения в фуллереновой матрице.

В четвертой главе рассматриваются спектральные свойства изготовленных с использованием термического испарения в вакууме плазмонно-фотонных систем с одномерной периодичностью структуры, при этом плотноупакованные монослои металлических наночастиц в таких системах разделены диэлектрическими промежутками разной толщины.

Экспериментально показано, что для плотноупакованного монослоя наночастиц серебра характерно наличие в области расположения полосы ППРП значительного отражения даже при малых размерах частиц (около 10-15 % для частиц диаметром 5 нм). Это обеспечивает условия для возникновения интерференции между монослоями в многослойной системе с субволновыми толщинами разделительных диэлектрических слоев. Были изготовлены многослойные плазмонно-фотонные системы, в которых фотонная запрещенная зона формировалась на частоте плазмонного резонанса. Установлено, что при четвертьволновых относительно длины волны максимума полосы ППРП

оптических толщинах разделительных слоев достигается одновременно минимизация пропускания и отражения в полосе ППРП, т.е. система характеризуется высоким поглощением излучения (можно достигать до 98 % и даже более в максимуме полосы ослабления). При полуволновых оптических толщинах разделительных слоев достигается минимизация пропускания, а также значительное отражение в полосе ППРП. Результаты эксперимента качественно хорошо согласуются с расчетами (рисунок 4). Таким образом, показано, что можно управлять спектральными характеристиками создаваемых плазмонных систем изменением их морфологии и топологии.

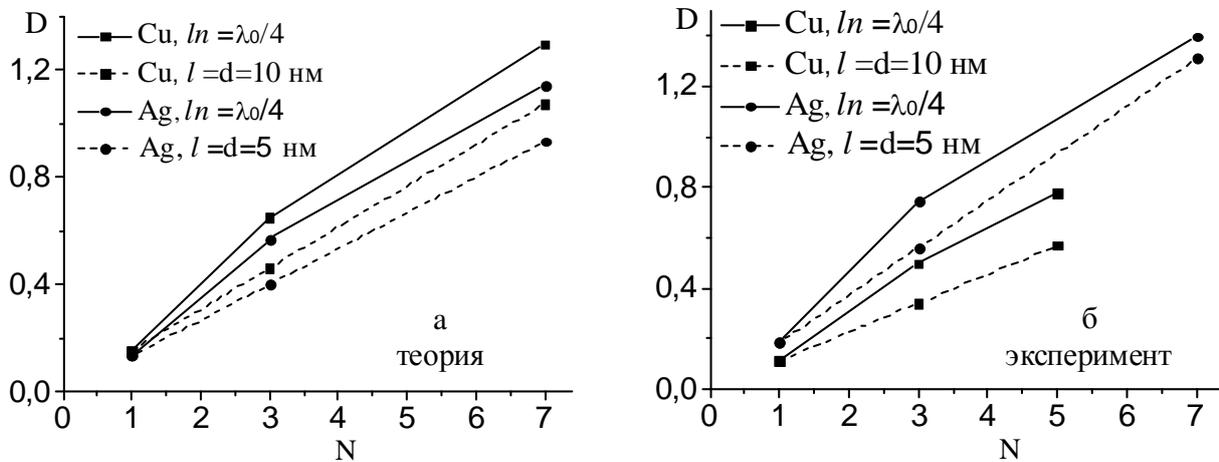


$\lambda_0 = 440$ нм; число слоев наночастиц $N=7$, $d=5$ нм, $\eta=0.5$; (а) $ln \approx \lambda_0/2$; (б) $ln \approx \lambda_0/4$

Рисунок 4. - Спектральная зависимость коэффициентов пропускания Т (сплошная линия) и отражения R (пунктир) изготовленной системы монослоев наночастиц серебра, разделенных пленками KCl различной толщины. На вставке: Спектральная зависимость Т и R для аналогичных систем, рассчитанная в квазикристаллическом приближении СТМРВ

На примерах многослойных структур, в которых плотноупакованные монослои металлических наночастиц разделены четвертьволновыми по оптической толщине диэлектрическими промежутками, показано, что при возрастании числа монослоев достигается неаддитивное увеличение оптической плотности в максимуме полосы ППРП, превышающее результат простого суммирования оптических плотностей составляющих монослоев. Это связано с выполнением условий для деструктивной интерференции в системах такого типа и наблюдается как для систем с монослоями наночастиц серебра, так и для структур с монослоями наночастиц меди. Экспериментальные результаты качественно согласуются с теоретическими расчетами (рисунок 5). Подобный эффект проявляется в системах с различными значениями параметра перекрытия ($\eta \sim 0.5$, $\eta \sim 0.7$), а также с разными материалами диэлектрических прослоек (Na_3AlF_6 , SiO).

Экспериментальные результаты показывают, что переход от наноструктур с субволновыми оптическими толщинами разделительных диэлектрических слоев к структурам с тонкими разделительными слоями приводит к тому, что



а - расчет в квазикристаллическом приближении, б – эксперимент;

N – число монослоев металлических наночастиц в системе

Рисунок 5. - Зависимость оптической плотности в максимуме полосы ППРП многослойных наноструктур Ag-KCl и Cu-KCl для случая четвертьволновых разделительных пленок KCl (сплошная линия) и в случае сложения оптической плотности составляющих наноструктуру монослоев (пунктир)

оптическая плотность в максимуме полосы ППРП многослойной системы аддитивно возрастает при увеличении числа плазмонных монослоев. Это наблюдается в тех случаях, когда толщины разделительных слоев сопоставимы или несколько превышают средние размеры частиц в монослоях.

В разделе 4.2 рассматриваются спектральные характеристики изготовленных многослойных наноструктур Ag-LiF и Ag-KCl, в которых толщины разделительных слоев меньше средних размеров плазмонных частиц. В этом случае расстояния между частицами сравнимы с их размерами не только в плоскости подложки, но и в других направлениях, а слоистость структуры менее выражена. Выявлено, что оптическая плотность в максимуме полосы ППРП такой многослойной системы меньше результата суммирования оптических плотностей составляющих плазмонных монослоев, а максимум ее полосы ППРП сдвинут в длинноволновую область спектра относительно максимума полосы ППРП составляющих монослоев.

Проведено сопоставление спектральных характеристик изготовленных наноструктур с теоретическими расчетами. Расчеты выполнялись в рамках приближения эффективной среды. Моделирование проводилось с использованием известной формулы Максвелла-Гарнетта (МГ) и

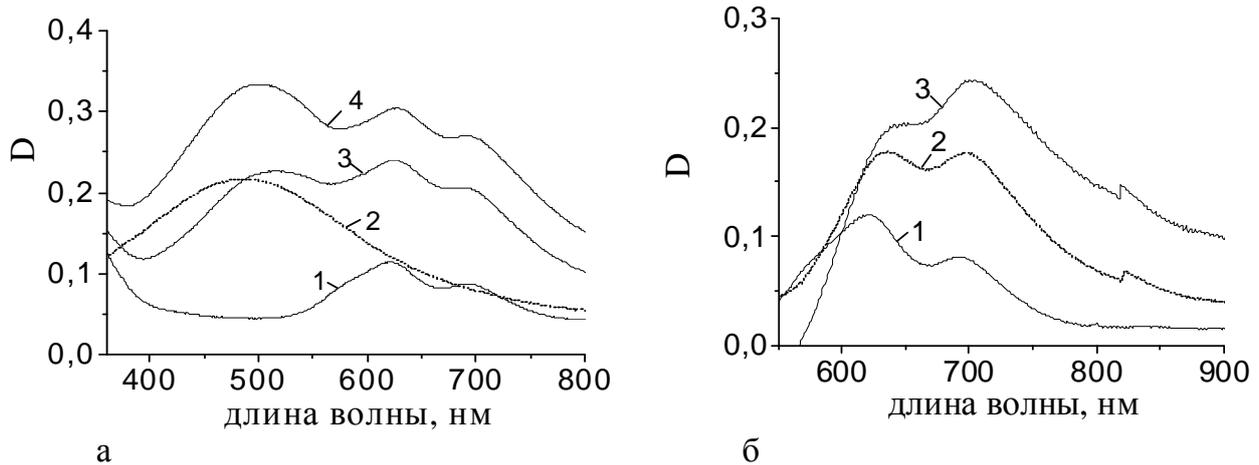
комбинированной модели эффективной среды (КМЭС), основанной на вероятностном подходе к описанию структуры образца. В рамках КМЭС учитывается как ситуация 1, когда в диэлектрической матрице размещены металлические наночастицы, так и ситуация 2, когда металлическая матрица содержит включения из диэлектрического материала. Показано, что КМЭС описывает более корректно по сравнению с приближением МГ интенсивности полос ППП изготoвленных наноструктур и их полуширины.

Пятая глава посвящена изучению проявления одного из важнейших свойств металлических плазмонных наночастиц - усиления локальных полей вблизи их поверхности. В разделе 5.2 приведены результаты экспериментальных исследований по выявлению возможностей увеличения оптической плотности тонких органических пленок в присутствии плазмонных наночастиц.

Увеличение оптической плотности органических пленок в УФ и видимом диапазонах является важной задачей для фотовольтаики. Причем, органическая пленка должна быть тонкой, поскольку длина диффузии экситона в органических материалах мала, а заряды должны дойти до электродов. Показано, что наличие наночастиц серебра в изготoвленных термическим испарением в вакууме гибридных наноструктурах Ag-CuPc, Ag-NiPc наиболее сильно увеличивает оптическую плотность пленки органического полупроводника в длинноволновом относительно полосы плазмонного резонанса спектральном диапазоне $\lambda = 600-800$ нм и достигает наибольших значений при сопоставимости толщин органических пленок и размеров плазмонных наночастиц.

Выявлено, что оптимизация спектров поглощения органической компоненты за счет проявления ближнеполевых взаимодействий может достигаться изменением топологии гибридной структуры. Например, может использоваться сэндвич-конфигурация, когда подсветка тонких органических пленок излучением локального поля осуществляется с обеих сторон их поверхностей (рисунок 6(а), кривая 4). Сравнивая кривые 1-4 на рисунке 6(а), можно отметить, что наличие плазмонных наночастиц в наноструктуре приводит к значительному (до 50% и более) увеличению оптической плотности гибридной системы по сравнению с простым сложением оптических плотностей компонентов.

Показано, что увеличение количества плазмонных слоев в гибридной системе Ag-CuPc приводит к уменьшению в области спектра $\lambda > 550$ нм оптической плотности, отнесенной на единицу толщины пленки CuPc. Это может быть связано с уменьшением интенсивности излучения, приходящего на каждый последующий монослой Ag из-за его ослабления предыдущими элементами наноструктуры. Установлено, что к такому же эффекту



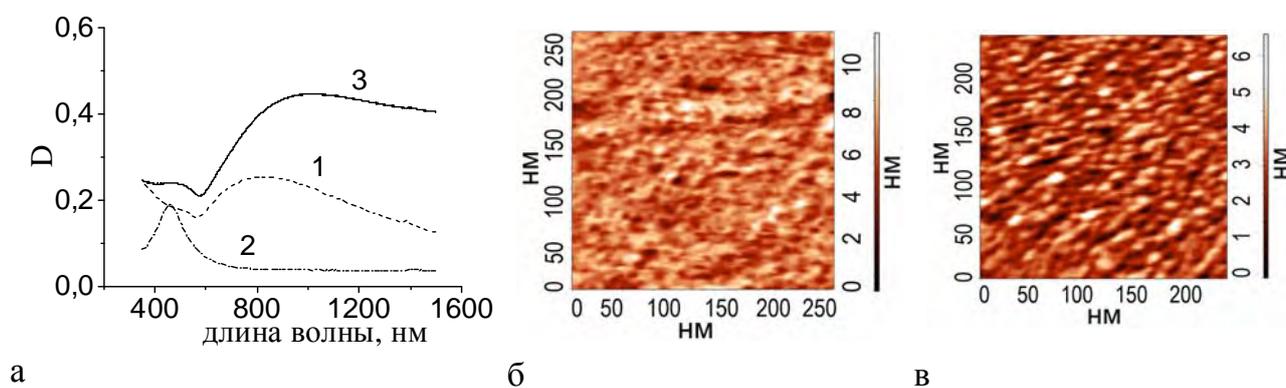
CuPc: $l \sim 7$ нм. Ag: $d_{cp} \sim 5$ нм, $\eta \sim 0.5$

Рисунок 6. – (а) Оптическая плотность пленки CuPc (1), монослоя Ag (2), наноструктур Ag-CuPc (3) и Ag-CuPc-Ag (4), а также (б) оптическая плотность пленки CuPc (1) и разностные спектры $(D_{Ag-CuPc} - D_{Ag})$ (2) и $(D_{Ag-CuPc-Ag} - 2D_{Ag})$ (3) соответствующих гибридных систем и плазмонных монослоев

(уменьшению ослабления) приводит и увеличение толщины органической пленки в структуре. Полученные результаты могут быть использованы не только в фотовольтаике, но и при разработке функциональных устройств на основе плазмонных гибридных материалов для поглощающих покрытий и биосенсоров.

В разделе 5.3 рассматриваются биметаллические наноструктуры Cu-Ag. Экспериментально обнаружено, что в двухслойных системах из наночастиц меди и серебра, полученных методом последовательного термического испарения данных металлов, достигается значительное (20-30% и более) увеличение оптической плотности по сравнению со сложением оптических плотностей соответствующих монослоев с такими же конструктивными параметрами (рисунок 7(а)). Полученные АСМ-изображения рельефа поверхности образцов показывают, что как монослой меди, так и биметаллическая двухслойная система медь-серебро являются наноструктурированными (рисунки 7(б)-7(в)).

Значительное усиление поверхностного плазмонного поглощения бинарной системы Cu-Ag в спектральном диапазоне $\lambda > 700$ нм, проявляющееся в области вне полосы межзонного поглощения данных металлов, может быть обусловлено сильными ближнеполевыми электродинамическими взаимодействиями между наночастицами серебра и меди в двухслойной наноструктуре. В результате таких взаимодействий может происходить гибридизация полос ППРП, следствием которой является спектральное перераспределение их интенсивности.



Ag: ППМ $\sim 1.67 \cdot 10^{-6}$ г/см², Cu: ППМ $\sim 4,53 \cdot 10^{-6}$ г/см²

Рисунок 7. – (а) Оптическая плотность монослоя меди (1), монослоя серебра (2) и биметаллической двухслойной структуры из этих монослоев (3), а также АСМ-изображения рельефа поверхности (б) монослоя меди и (в) двухслойной системы медь-серебро

В пользу такого предположения косвенно свидетельствует специфический характер рассчитанной спектральной зависимости коэффициента усиления ближнего поля для биметаллической наночастицы, состоящей из медного ядра и серебряной оболочки. Ее особенность по сравнению со случаем монометаллических наночастиц состоит в том, что максимальные значения коэффициента усиления ближнего поля достигаются в существенно более длинноволновой спектральной области относительно максимума фактора эффективности поглощения.

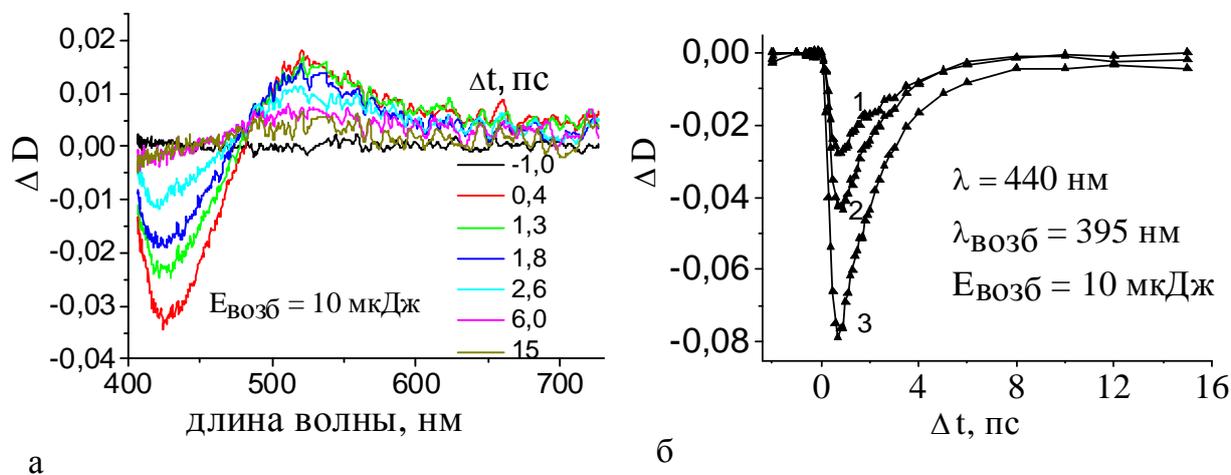
В разделе 5.4 сообщается о зарегистрированной люминесценции плотноупакованных монослоев наночастиц Ag в области спектра 550-750 нм при малоинтенсивном (плотность мощности ~ 10 мВт/см²) ламповом возбуждении на длине волны 450 нм. Излучательными центрами в рассмотренных наноструктурах могут являться молекулярные кластеры серебра. Такой результат важен по причине перспективности применения подобных систем в устройствах молекулярной электроники, где важным является требование, чтобы управляющие сигналы для переключения и активации рабочих характеристик имели малую интенсивность.

В шестой главе приведены результаты изучения динамики релаксации электронных возбуждений в плазмонных наноструктурах при возбуждении ультракороткими лазерными импульсами. Использовалась методика возбуждение-зондирование. Возбуждение образцов производилось в полосе ППП наноструктуры на длине волны 395 нм второй гармоникой титан-сапфирового лазера.

Установлено, что при импульсных воздействиях на плотноупакованный монослой наночастиц серебра в области полосы ППП появляется полоса наведенного просветления, а на ее длинноволновом краю полоса наведенного

поглощения (рисунок 8(а)). Появление таких полос связано с сильным разогревом электронной системы и ее переходом в неравновесное состояние. В ходе релаксационных процессов идет восстановление спектральных характеристик за счет электрон-электронного и электрон-поверхностного рассеяния, а также дальнейшего взаимодействия электронов с решеткой и матрицей. Для плотноупакованного монослоя наночастиц серебра, расположенного в криолитовой матрице, установлено немонотонное изменение времени релаксации наведенных изменений в полосе ППП в зависимости от величины поверхностной плотности металла. Показано, что основными причинами таких изменений являются геометрический фактор (влияние размеров частиц) и фактор туннелирования электронов.

Установлено также, что амплитуда нелинейно-оптического отклика многослойной плазмонно-фотонной наноструктуры $(\text{Ag}-\text{Na}_3\text{AlF}_6)^4\text{Ag}$ на возбуждение фемтосекундными лазерными импульсами зависит от толщин разделительных диэлектрических промежутков между монослоями. Показано, что максимальная амплитуда наведенного просветления достигается в системе с четвертьволновыми по оптической толщине разделительными слоями (рисунок 8(б)). В этом случае неоптимальное после возбуждения состояние



а

б

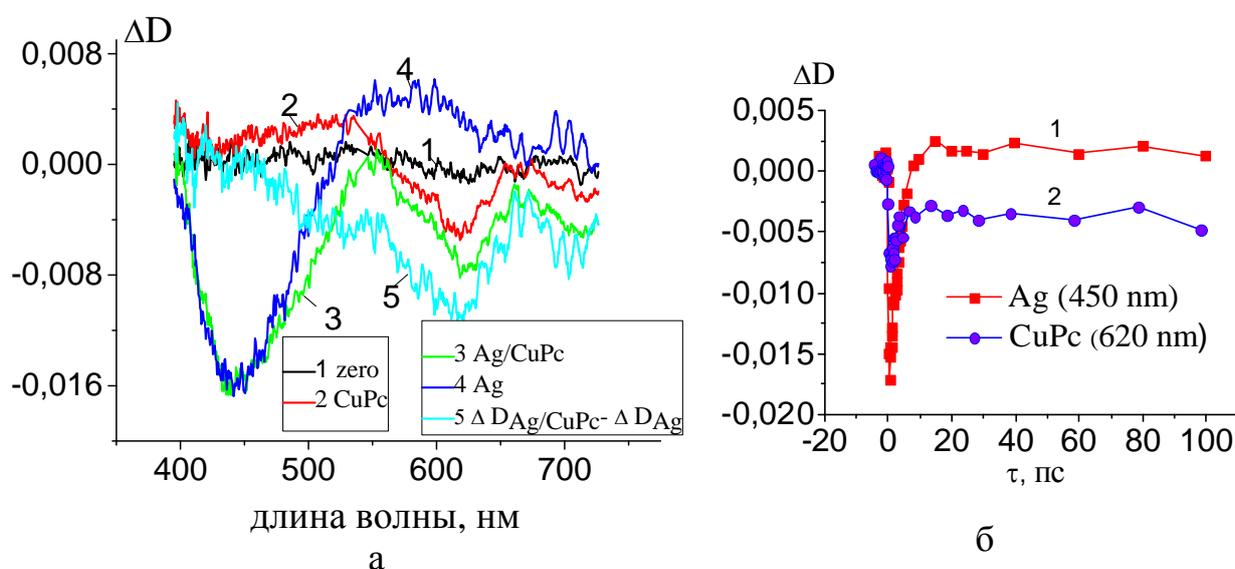
Ag: ППМ $\sim 1.9 \times 10^{-6}$ г/см², $\eta \sim 0.5$; $\lambda_{\text{возб}} = 395$ нм, $E_{\text{возб}} = 10$ мкДж

Рисунок 8. – (а) Дифференциальные спектры нестационарного поглощения плотноупакованного монослоя Ag и (б) кинетика наведенной оптической плотности для монослоя Ag (1) и систем $(\text{Ag}-\text{Na}_3\text{AlF}_6)^4\text{Ag}$ со слоями Na_3AlF_6 толщиной $l \sim 10$ (2) и 80 (3) нм на длине волны $\lambda = 440$ нм

электронной подсистемы плазмонных наночастиц сопровождается нарушением условий проявления деструктивной межслойной интерференции. Затем в процессе релаксации происходит восстановление плазмонной системы и спектральных характеристик.

Для гибридных систем Ag-CuPc показано, что при воздействии

фемтосекундного лазерного импульса полосы наведенного просветления появляются как в области полосы ППП, так и в области расположения полос электронного поглощения органического материала (рисунок 9(а)). При этом быстрая компонента кинетики релаксации просветления в области полос поглощения фталоцианина меди совпадает с временем быстрой компоненты релаксации наведенных изменений оптической плотности в полосе плазмонного резонанса (рисунок 9(б)). Это свидетельствует о плазмон-зависимой природе обнаруженного просветления и объясняется зависимостью эффективности усиления поглощения CuPc от состояния электронной



Ag: $d \sim 15-20$ нм, CuPc: $l \sim 25$ нм; $E_{\text{возб}} = 10$ мкДж

Рисунок 9. – (а) Нулевая линия (1), дифференциальные спектры поглощения пленки CuPc (2), гибридной наноструктуры Ag-CuPc (3), нанослоя Ag (4) и разность дифференциальных спектров наноструктуры Ag-CuPc и нанослоя Ag (5), а также (б) кинетики изменения оптической плотности гибридной двухслойной структуры Ag-CuPc на различных длинах волн

подсистемы наночастиц серебра.

Установлено, что наведенное фемтосекундным лазерным излучением просветление полосы ППП сопровождается ослаблением интенсивности ближнего поля и, следовательно, приводит к уменьшению вклада плазмон-зависимого поглощения пленки CuPc. В дифференциальных спектрах оптической плотности это проявляется как увеличение амплитуды просветления в спектральной области 550-800 нм, где расположены полосы электронного поглощения CuPc. Термализация электронов сопровождается восстановлением не только полосы ППП наночастиц серебра, но и величины коэффициентов усиления ближнего поля, что сопровождается также восстановлением вызванного ближнеполевыми эффектами добавочного

поглощения CuPc.

Рассматривалась задача расширения спектральной области проявления плазмон-зависимой модификации спектрально-кинетических свойств тонкой органической пленки. Для этого исследовались системы Ag-NiPc, в которых проявляется эффект плазмон-зависимой модификации оптических свойств тонкой пленки NiPc. Выявлено, что при уменьшении энергии возбуждения в нестационарных спектрах поглощения чистых пленок NiPc толщиной 10 - 30 нм амплитуда наведенного просветления в области полос электронного поглощения становится сопоставимой с уровнем шумов. Показано, что для разделенной на две части пленки NiPc, поверхность каждой части которой контактирует с наночастицами серебра, оптический отклик в области длинноволновых полос электронного поглощения NiPc существенно возрастает, становясь ярко выраженным и при малых энергиях возбуждения 3-5 мкДж, когда в чистой органической пленке эквивалентной толщины его не удается надежно зарегистрировать. Исследования спектрально-кинетических характеристик плазмонных наноструктур важны для создания полностью оптических быстродействующих модуляторов и переключателей.

В седьмой главе на примерах экспериментально изготовленных структур Ag - Na₃AlF₆ рассматриваются спектрально-селективные свойства слоистых структур с плазмонными резонансами и субволновой периодичностью. Решается задача создания широкополосных поглощающих покрытий для видимого диапазона с малым уровнем отражения в области поглощения. Для такой задачи оптимальными являются наноструктуры с четвертьволновыми разделительными слоями, для которых в максимуме полосы ППП одновременно достигается минимизация пропускания и отражения, т.е. максимальных значений достигает поглощение излучения.

Разработана методика создания частично-упорядоченных, одномерно-периодических плазмонных систем Ag-Na₃AlF₆, расположенных на полимерных пленках-подложках. В этом случае упрощается задача увеличения числа слоев в структуре для расширения зоны подавления излучения. Установлено, что зеркальное отражение широкополосных поглощающих покрытий, в составе которых имеются продольно-градиентные по величине поверхностной плотности металла плазмонные системы, не превышает 1 % при углах падения излучения до ~ 45°.

Предложены конструкции многослойных антиотражающих покрытий, действие которых основано на эффектах межслойной интерференции и поверхностного плазмонного поглощения. Изготовлены лабораторные образцы отрезающих фильтров для ближнего ИК диапазона с перестройкой границы отрезания от 845 до 1280 нм и пропусканием в рабочей области 60-70%, в которых остаточное пропускание в спектральных областях подавления

излучения составляет не более 0.05 % при отражении менее 1 % (рисунок 10). Покрытия могут представлять интерес для использования в устройствах отображения информации для повышения контрастности изображений шкал и цифровых индикаторов, работающих в условиях сильной фоновой засветки.

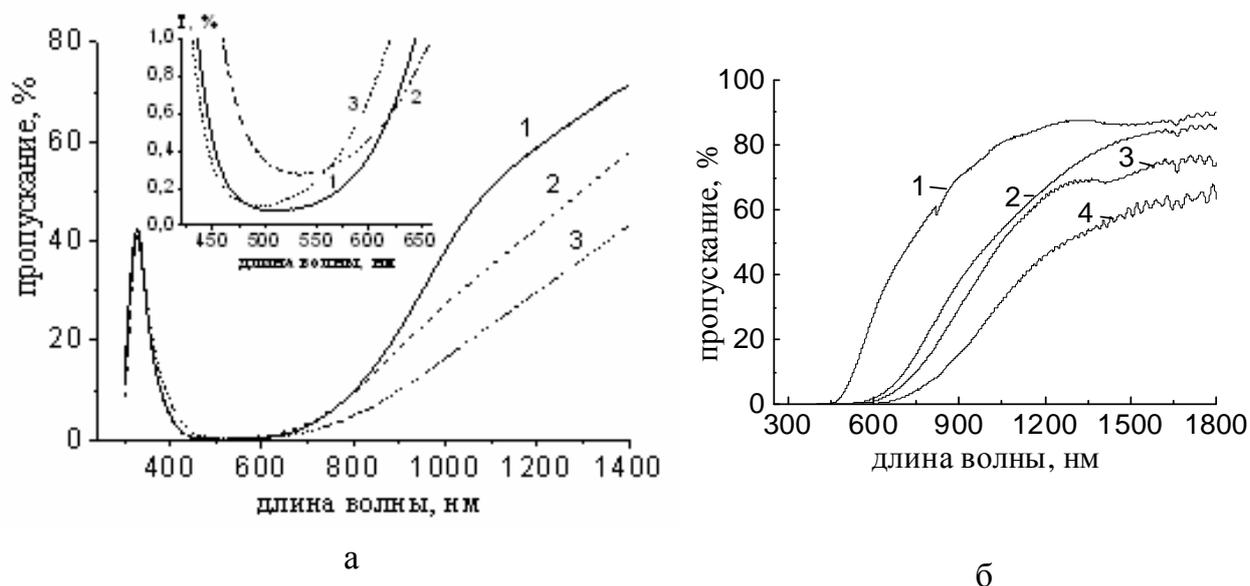


Рисунок 10. - (а) Спектральные характеристики наноструктур с одинаковым суммарным содержанием металла и различной микроструктурой: все монослои одинаковы (1), продольно-градиентные системы с меньшей (2) и большей (3) степенью градиентности, а также (б) спектральные характеристики отрезающих фильтров различных конструкций для ближнего ИК диапазона на основе наноструктур $\text{Ag} - \text{Na}_3\text{AlF}_6$, содержащих: 5 монослоев Ag с ППМ $5.5 \times 10^{-6} \text{ г/см}^2$ (1); 8 монослоев Ag с ППМ $7.66 \times 10^{-6} \text{ г/см}^2$ (2,3); 8 монослоев Ag с ППМ $7.66 \times 10^{-6} \text{ г/см}^2$ и 4 монослоя Ag с ППМ $5.5 \times 10^{-6} \text{ г/см}^2$ (4); подложки: (1, 2) – полиимид; (3,4) - полиэтилен

Оптимизация плазмонных поглощающих покрытий (расширение зоны подавления при меньшем числе слоев), их модификация возможна с применением биметаллических наночастиц серебро-медь. Плазмонные поглощающие наноструктуры отличаются от других типов поглощающих покрытий тем, что ослабление излучения в них достигается при малых толщинах активных слоев. Они характеризуются также быстрым оптическим откликом на импульсные лазерные воздействия (единицы пикосекунд).

В разделе 7.2 рассматриваются спектрально-селективные свойства структур с субволновой периодичностью для терагерцового диапазона ($\sim 1 - 10$ ТГц, что соответствует длинам волн $\sim 300 - 30$ мкм). Исследования проводились на основе использования полимер-кристаллических интерференционных систем (ПКИС), в которых полимерные пленки выступают

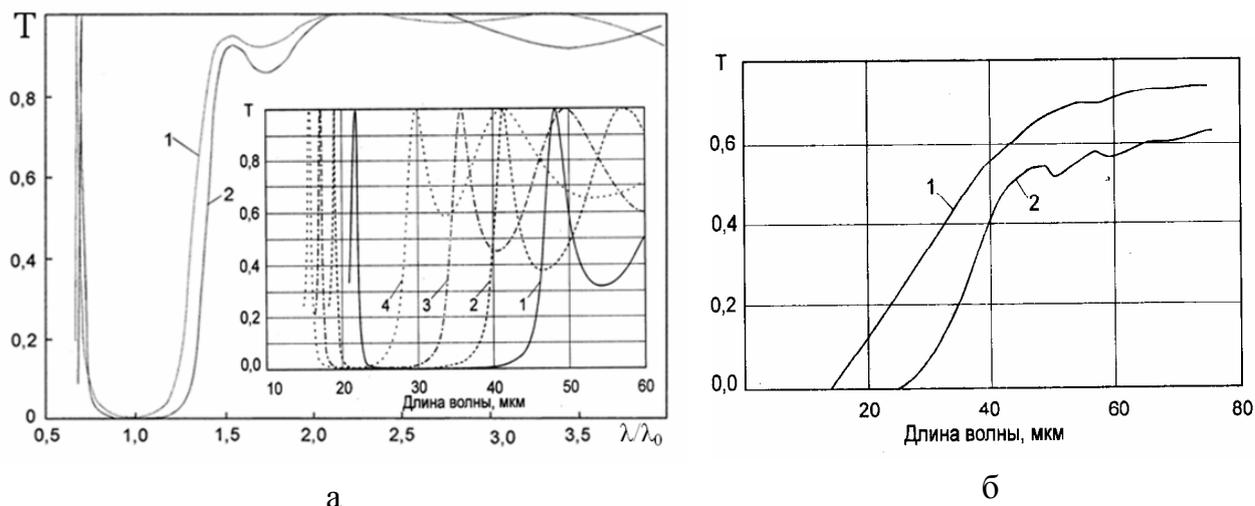
в качестве интерференционных слоев с низким показателем преломления, а в сочетании с ними используется германий. Ранее было показано, что четвертьволновая для ближнего или среднего ИК диапазона многослойная интерференционная система (МИС) Ge-LiF проявляет себя в дальнем ИК диапазоне 100-300 мкм как квазиоднородный слой с высоким показателем преломления. Это достигается благодаря тому, что Ge в области спектра 2-300 мкм имеет высокий показатель преломления (ПП) $n=4$, а ПП LiF изменяется от высоких значений $n \sim 3$ в дальнем ИК диапазоне $\lambda > 50$ мкм до низких значений $n = 1.35 - 1.1$ в ближнем ИК диапазоне $\lambda = 2-10$ мкм.

Предложено использовать для расширения зоны подавления фонового излучения в коротковолновых отрезающих фильтрах для терагерцового диапазона несимметричные по структуре ПКИС с квазиоднородными слоями высокого показателя преломления, сформированные на основе элементарных систем Ge-LiF, интерференционные слои в которых являются четвертьволновыми для разных длин волн ближнего и среднего ИК диапазонов. Показано, что при формировании квазиоднородных слоев с высоким ПП можно использовать не только четвертьволновые элементарные МИС Ge-LiF, но и системы с нечетвертьволновыми слоями Ge и LiF. При этом должно выполняться одно условие - суммарные оптические толщины (СОТ) элементарных слоев Ge и СОТ элементарных слоев LiF должны быть одинаковыми для всех квазиоднородных слоев в ПКИС. В этом случае в дальнем ИК диапазоне для каждого квазиоднородного слоя формируется идентичная спектральная характеристика и достигаются оптимальные условия для изготовления коротковолнового отрезающего фильтра.

Использование квазиоднородных слоев с высоким ПП в дальнем ИК диапазоне возможно только для длин волн $\lambda > 50$ мкм. В области спектра 30-50 мкм у LiF имеется значительное поглощение. Для создания коротковолновых отрезающих фильтров в этом спектральном диапазоне предложено использовать интерференционные системы полиэтилен-германий со слоями неравной оптической толщины вида $[(H-C)(L+C)]^k(H-C)$, где H и L - четвертьволновые слои из германия и полимерного материала, C - параметр неравнотолщинности, k - целое число. Такие системы уже продемонстрировали свою эффективность для управления спектральным положением границы отрезания в пределах изменения C от 0.1 до 0.3H. Установлено, что и для более широких пределов изменения параметра неравнотолщинности C (от 0.3 до 0.5H) в окрестности $\lambda_0 = (H+L)/2$ формируется полоса высокого отражения и рассматриваемая интерференционная система может быть использована для задания границы отрезания коротковолнового отрезающего фильтра (рисунок 11(a)). Показано, что если одновременно с изменением параметра неравнотолщинности C производить изменение периода интерференционной

структуры полиэтилен-германий, то при использовании полимерной пленки одной толщины (5 мкм) можно обеспечить смещение границы отрезания коротковолнового отрезающего фильтра в спектральном диапазоне $\lambda = 30\text{-}50$ мкм.

Предложены методы повышения пропускания в области вторичных минимумов в полосе прозрачности интерференционных систем полиэтилен-германий добавлением дополнительных нечетвертьволновых обрамляющих слоев из полиэтилена и германия. Экспериментально изготовлены интерференционные системы полимер-германий с параметром неравнотолщинности $S=0.4H$ и проведена их оптимизация, в результате которой пропускание в области вторичных экстремумов в дальнем ИК-диапазоне повышено до 80%. Показано, что система полимер-германий даже с таким большим значением параметра неравнотолщинности может быть скомбинирована с рассеивающим фильтром кремний-полиэтилен для подавления вторичных полос пропускания в коротковолновом диапазоне (рисунок 11(б)). Пропускание комбинированного фильтра в рабочей области



На вставке (а) приведены рассчитанные спектральные характеристики 7-слойных ПКИС ПЭ-Ge $[(H-C)(L+C)]^3(H-C)$ с различными конструктивными параметрами: 1 – $S=0$, $\lambda_0 = 30$ мкм; 2 – $S=0.15H$, $\lambda_0 = 26$ мкм; 3 – $S=0.3H$, $\lambda_0 = 23$ мкм; 4 – $S=0.5H$, $\lambda_0 = 20$ мкм; толщина ПЭ равна 5 мкм

Рисунок 11. – (а) Спектральные характеристики рассчитанных систем полиэтилен-Ge $2.25L0.5HLHL0.5H2.25L$ (1) и $2.5L0.5H(LH)^2L0.5H2.5L$ (2), (б) спектры пропускания рассеивающего (1) и интерференционно-рассеивающего (2) изготовленных фильтров

спектра достигает 60%, а крутизна границы отрезания составляет ~ 0.7 . Крутизну границы отрезания можно повысить до ~ 0.8 , увеличивая число слоев в интерференционной компоненте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Экспериментально показано, что регулирование условий электронного ограничения в 2D-наноструктурах с поверхностным плазмонным резонансом поглощения (ППРП) путем изменения средних размеров ($d_{cp} \sim 5-15$ нм) и плотности упаковки частиц ($\eta \sim 0.4-0.7$) позволяет управлять их спектрами пропускания и отражения в видимом диапазоне. Анализ полученных экспериментально результатов и их сопоставление с расчетами, выполненными в квазикристаллическом приближении теории многократного рассеяния волн, показывает, что ответственными за длинноволновый сдвиг максимума полосы ППРП при увеличении поверхностной плотности металла являются 2D электродинамические взаимодействия между металлическими наночастицами, т.е. когерентное переоблучение частицами друг друга. Получено качественное согласие экспериментальных и теоретических результатов [14, 15, 37].

2. Установлено, что оптические свойства материала матрицы оказывают сильное влияние на спектральную область проявления полос резонансного плазмонного поглощения расположенного в ней плотноупакованного монослоя наночастиц Ag, что связано с возрастанием величины кулоновского динамического экранирования коллективных колебаний электронной плотности в металлических частицах при увеличении показателя преломления матрицы [14,17,18,22,34]. Показано, что экспериментально зарегистрированная чувствительность спектрального положения максимума полосы ППРП плотноупакованных систем металлических наночастиц к изменению показателя преломления окружающей среды существенно превышает (более, чем на 60 %) чувствительность сферической наночастицы с аналогичными размерами [14, 15, 37].

3. На примерах металлофуллереновых наноструктур Au-C₆₀ и Cu-C₆₀, характеризующихся параметрами перекрытия $\eta < 1$, показано, что собственное поглощение в фуллереновой матрице, в которую внедрены плазмонные наночастицы с высокой концентрацией, приводит к ослаблению коллективных электродинамических взаимодействий между металлическими наночастицами, что проявляется в подавлении концентрационной зависимости спектрального положения максимума полосы поверхностного плазмонного резонанса поглощения [13, 31, 32, 38, 39, 42, 56, 66].

4. Экспериментально установлено, что создание квазиодномерных плазмонно-фотонных кристаллов, в которых плотноупакованные монослои плазмонных наночастиц разделены диэлектрическими слоями субволновой толщины относительно максимума полосы плазмонного резонанса, позволяет

управлять спектрами пропускания, отражения и поглощения таких систем за счет варьирования условий межслойной интерференции [10-12, 23]. Получено качественное согласие экспериментальных результатов по оптическим свойствам металл-диэлектрических квазиодномерных фотонных кристаллов с расчетами в квазикристаллическом приближении теории многократного рассеяния волн с последующим применением метода самосогласованного поля [10-12, 36, 40, 43].

5. На примерах экспериментально изготовленных слоистых наноструктур Ag-KCl, Cu-KCl, Ag-Na₃AlF₆ и Ag-SiO показано, что увеличение числа монослоев плазмонных наночастиц, разделенных четвертьволновыми диэлектрическими пленками, приводит к увеличению оптической плотности в максимуме полосы ППП, превышающему результат простого суммирования оптических плотностей составляющих монослоев, что обусловлено влиянием на спектральные свойства структуры коллективных электродинамических взаимодействий между плотноупакованными монослоями металлических наночастиц и выполнением в указанных структурах условий для деструктивной интерференции [10 -12, 36, 40, 43].

6. Показано, что наличие наночастиц серебра в изготовленных термическим испарением в вакууме гибридных металлофталоцианиновых наноструктурах Ag-CuPc, Ag-NiPc значительно (до 50% и более) увеличивает оптическую плотность органической подсистемы в длинноволновом относительно полосы плазмонного резонанса спектральном диапазоне $\lambda = 600-800$ нм и достигает наибольших значений при сопоставимости толщины органической пленки и размеров плазмонных наночастиц. Оптимизация условий для модификации спектров поглощения органической компоненты за счет проявления ближнеполюсных взаимодействий может достигаться изменением топологии гибридной структуры, например, использованием сэндвич-конфигурации, когда подсветка тонких органических пленок излучением локального поля осуществляется с обеих сторон их поверхностей [20, 21, 26, 28, 35, 57, 60, 63, 65].

7. Экспериментально обнаружено, что в двухслойных системах из наночастиц меди и серебра, полученных методом последовательного термического испарения данных металлов, достигается значительное (~ 20-30%) увеличение оптической плотности в спектральной области проявления плазмонного резонанса меди по сравнению со сложением оптических плотностей соответствующих монослоев с такими же конструктивными параметрами. Это демонстрирует усиление поверхностного плазмонного резонанса наночастиц меди, вызванного наличием сильных ближнеполюсных взаимодействий между наночастицами меди и серебра в условиях высокой локальной неоднородности электромагнитного поля [16, 46, 47].

8. Установлено, что оптимизация амплитуды нелинейно-оптического отклика многослойной плазмонно-фотонной наноструктуры на возбуждение фемтосекундными лазерными импульсами может достигаться изменением величины поглощения в ее стационарном спектре на длине волны оптического отклика как за счет варьирования конструктивных параметров монослоя плазмонных частиц Ag, так и толщин l разделительных диэлектрических промежутков между монослоями. При этом зависимость амплитуды наведенных изменений ΔD от фактора l является немонотонной, что отражает ее зависимость от условий «продольного» фотонного конфинмента (ограничения) в металло-диэлектрической системе. Характеристические времена релаксации τ наводимых изменений при энергиях возбуждения 5-10 мкДж для наноструктур Ag-Na₃AlF₆ с различными l практически не изменяются и совпадают с временными параметрами кинетического отклика, характерными для используемого монослоя плазмонных наночастиц с параметром перекрытия η . Увеличение η в монослое Ag от $\eta = 0.4$ до $\eta = 0.6$ сопровождается увеличением τ более, чем в 2 раза [19, 27, 49, 50, 62].

9. Обнаружено, что при воздействии фемтосекундного лазерного импульса на гибридную систему Ag-CuPc в области полосы ПППП наведенное просветление появляется как в спектральной области полосы плазмонного поглощения, так и в области электронного поглощения органической пленки. При этом установлена быстрая компонента кинетики релаксации просветления в области полос поглощения фталоцианина меди совпадает с временем быстрой релаксации наведенных изменений оптической плотности в полосе плазмонного резонанса. Это указывает на то, что имеет место плазмон-зависимая модификация спектрально-кинетических свойств тонкой органической пленки в присутствии плазмонных наночастиц [24, 29, 30, 33, 52].

10. На основе слоисто-периодических систем Ag-Na₃AlF₆, содержащих плотноупакованные слои наночастиц серебра и разделительные диэлектрические слои Na₃AlF₆ субволновой толщины, предложены конструкции многослойных поглощающих антиотражающих покрытий, действие которых основано на эффектах межслойной интерференции и поверхностного плазмонного поглощения. Изготовлены лабораторные образцы отрезающих фильтров для ближнего ИК диапазона с перестройкой границы отрезания от 845 до 1280 нм и пропусканием в рабочей области 60-70%, в которых остаточное пропускание в спектральных областях подавления излучения составляет не более 0.05 % при отражении менее 1 %. Показано, что зеркальное отражение широкополосных поглощающих покрытий, в состав которых входят продольно-градиентные плазмонные системы, не превышает 1 % при углах падения излучения до $\sim 45^\circ$ [16, 25, 46, 55, 93, 94].

11. Предложено использовать для расширения зоны подавления фонового

излучения в коротковолновых отрезающих фильтрах для терагерцового диапазона несимметричные по структуре полимер-кристаллические интерференционные системы с квазиоднородными слоями высокого показателя преломления [2, 3, 6, 7]. Исследованы особенности спектральных характеристик систем полиэтилен-германий со слоями неравной оптической толщины при варьировании параметра неравнотолщинности S от 0 до 0.5H [1, 9]. Предложены методы повышения пропускания в области вторичных минимумов в полосе прозрачности интерференционных систем полиэтилен-германий добавлением дополнительных нечетвертьволновых обрамляющих слоев из полиэтилена и германия [4, 8, 9]. Разработаны способы изготовления полимер-кристаллических интерференционных систем на область спектра $\lambda = 30 - 50$ мкм и их комбинирования с отрезающей рассеивающей компонентой [1, 4, 5, 8].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Установленные закономерности управления спектрами пропускания и отражения плазмонных и плазмонно-фотонных наноструктур за счет варьирования их конструктивных параметров использованы для разработки новых типов прогрессивных оптических элементов – селективных поглощающих антиотражающих покрытий, отрезающих фильтров.

На основе разработанных гибридных структур с регулируемым уровнем допирования плазмонными наночастицами и установленных корреляций их спектральных и микрофизических свойств в рамках международного проекта Ф20ЕА-006 “Ближнеполевые межчастичные взаимодействия и динамика оптического отклика гибридных металл-полупроводниковых наноструктур на нано- и фемтосекундное лазерное возбуждение” осуществляется разработка новых функциональных материалов для нанофотоники и оптоэлектроники, удовлетворяющих требованиям высокой чувствительности к световым воздействиям и спектральной селективности.

Обнаруженное в двухслойных системах из наночастиц меди и серебра, полученных методом последовательного термического испарения данных металлов, значительное увеличение оптической плотности по сравнению со сложением оптических плотностей соответствующих монослоев с такими же конструктивными параметрами, целесообразно использовать при изготовлении интерфейсных соединений.

Установленная немонотонная зависимость амплитуды оптического отклика многослойной металло-диэлектрической системы на возбуждение фемтосекундными лазерными импульсами, связанная с выполнением в ней условий для «продольного» фотонного конфинмента может быть

использована при разработке новых типов быстродействующих полностью оптических модуляторов и переключателей.

Разработанные подходы к созданию многослойных антиотражающих покрытий, действие которых основано на эффектах межслойной интерференции и поверхностного плазмонного поглощения, использованы в ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» для устранения фоновой засветки и повышения интенсивности регистрируемых сигналов при исследовании фотопроводимости тонких пленок полупроводниковых материалов (ПРИЛОЖЕНИЕ В к диссертации).

Присутствие в одномерной плазмонно-фотонной структуре компонентов с продольным градиентом поверхностной плотности металла, уменьшающих остаточное отражение в области поглощения данной структуры, перспективно для использования при изготовлении индикаторных экранов и шкал, которые должны сохранять высокую контрастность изображения при работе в условиях наличия интенсивного фонового излучения.

Разработанные коротковолновые отрезающие фильтры для ИК области спектра $\lambda = 30 - 100$ мкм использованы в ГНУ «ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА имени А.В. ЛЫКОВА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ» для устранения фонового излучения при проведении исследований в рамках международного проекта «Фотосенсибилизация наноструктурированных биоактивных молекулярных систем» (ПРИЛОЖЕНИЕ В к диссертации).

Полученные новые данные о механизмах и закономерностях взаимодействия оптического излучения с многослойными наноструктурами, содержащими плазмонные металлические наночастицы и тонкие (субволновые) диэлектрические и/или полупроводниковые пленки, развивают представления о влиянии эффектов пространственного фотонного конфинмента на модификацию спектрально-селективных и спектрально-кинетических характеристик и способствуют более глубокому пониманию роли ближнепольных взаимодействий в таких наноструктурах.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. Борисевич, Н.А. High-contrast composite infrared filters /Н.А. Борисевич, А.Д.Замковец, А.Н.Понявина // Proc. SPIE. – 1991. - v.1500. - P.222-233.
2. Замковец, А.Д. Влияние периодической неоднородности в интерференционном слое на оптические свойства полимер-кристаллической системы/ А.Д.Замковец, А.Н.Понявина// Журнал прикладной спектроскопии. – 1993. - Т.59,№1-2. - С.134-138.
3. Замковец, А.Д. Оптимизация параметров периодической неоднородности в интерференционных слоях полимер- кристаллической системы/ А.Д.Замковец // Журнал прикладной спектроскопии. – 1996. - Т.63,№3. - С.520-524.
4. Верещагин, В.Г. Отрезающие фильтры для далекой ИК области спектра / В.Г. Верещагин, А.Д.Замковец // Оптический журнал. - 1998. - Т.65, №4. - С.79-81.
5. Инфракрасные фильтры и анализаторы состава веществ на их основе / А.Д.Замковец, М.П. Захарич, В.П. Комар, И.В. Скорняков// Журнал прикладной спектроскопии. – 1998. - Т.65,№5. - С.734-744.
6. Zamkovets, A.D. Two-scaled multilayer interference polimer-Ge-LiF systems / A.D. Zamkovets, A.N. Ponyavina //Appl. Surf. Science. – 1999. – Vol.142. - P.276-279.
7. Замковец, А.Д. Фильтрация ИК излучения трехкомпонентными полимер кристаллическими системами/ А.Д.Замковец, Р.Н. Онищенко // Журнал прикладной спектроскопии. - 2000. - Т.67, №3. - С. 379-381.
8. Замковец, А.Д. Полімер-кристалічні інтерференційні системи для області спектра 30-50 мкм/ А.Д. Замковец // Фізика і хімія тверд. тіла. – 2001. - Т 2, №4. - С. 647-653.
9. Замковец, А.Д. Сглаживание вторичных экстремумов в полосе прозрачности интерференционного полимер-кристаллического фильтра/ А.Д.Замковец // Оптический журнал. – 2002. - Т.69,№1. - С.36-39.
10. Оптические спектры металл- диэлектрических наноккомпозитов со слоистой субволновой структурой// А.Д.Замковец, С.М.Качан, А.Н.Понявина, Н.И.Сильванович// Журнал прикладной спектроскопии. - 2003. - Т.70, №4. - С.526-530.
11. Zamkovets, A.D. Optical properties of thin-film metal-dielectric nanocomposites/ A.D. Zamkovets, S.M. Kachan, A.N. Ponyavina // Physics and

Chemistry of Solid State. - 2003. - Vol.4, №4. - P.628-632.

12. Замковец, А.Д. Оптические свойства металл- диэлектрических нанокомпозитов со слоистой структурой/ А.Д.Замковец, А.Н.Понявина// Оптический журнал. -2004. - №4. - С.120-125.

13. Шпилевский, Э.М. Плазмонный резонанс в наноструктурах золото-фуллерен/ Э.М. Шпилевский, А.Д.Замковец// Оптический журнал. - 2008. - Т.75, № 5. - С.18-21.

14. Замковец, А.Д. Концентрационное усиление чувствительности поверхностного плазмонного резонанса металлических наночастиц к характеристикам диэлектрического окружения/ А.Д.Замковец, С.М.Качан, А.Н.Понявина// Журнал прикладной спектроскопии. - 2008. - Т. 75, № 4. - С. 568-572.

15. Замковец, А.Д. Высокий сенсорный потенциал самоорганизующихся металлических наноструктур/ А.Д.Замковец, С.М.Качан, А.Н.Понявина// Сенсорная электроника и микросистемные технологии. – 2008. - N4. - С. 74-79.

16. Замковец, А.Д. Усиление плазмонных резонансов в биметаллических планарных наноструктурах/ А.Д.Замковец, А.Н. Понявина, Л.В. Баран // Оптический журнал. - 2010. - Т. 77, №7. - С. 64-68.

17. Surface plazmon resonance in nanostructures based on polyparaphenylene - silver monolayers/ A.D. Zamkovets, A.N. Ponyavina, L.V.Baran, O.I. Aksimentyeva // Molecular Crystals & Liquid Crystals. - 2011. - Vol.536. - P. 86/[318]-92/[324].

18. Замковец, А.Д. Спектральное проявление поверхностного плазмонного резонанса в наноструктурах полипарафенилен-серебро/А.Д.Замковец, А.Н. Понявина, Е.И. Аксиментьева //Оптический журнал. - 2011. - Т.78, № 2. - С.3-7.

19. Динамика электронных возбуждений в плазмонных плотноупакованных наноструктурах Ag/Na_3AlF_6 при импульсном лазерном воздействии/ О.В.Буганов, А.Д.Замковец, А.Н. Понявина, С.А. Тихомиров, Л.В. Баран// Журнал прикладной спектроскопии. – 2011. - Т. 78 , №5. - С. 735-741.

20. Modification of the optical spectra of organic semiconductor thin films doped by plasmonic nanoparticles/ V.N.Bogach, R.A.Dynich, A.D.Zamkovets, A.N.Ponyavina// Physics and Chemistry of Solid State. – 2011. - Vol.12, №4. - С.955-959.

21. Замковец, А.Д. Влияние эффектов ближнего поля на спектральные свойства слоистых нанокомпозитов серебро-фталоцианин меди/ А.Д. Замковец, А.Н. Понявина// Журнал прикладной спектроскопии. - 2012. - Т. 79, №6. С.907-912.

22. Замковец, А.Д. Спектрально- люмінесцентні властивості плазмонних нанокомпозитів при малоінтенсивному ламповому збудженні/ А.Д. Замковец, П.П. Першукевич// Фізика і хімія тверд. тіла.- 2012. - Т.13, №2.- С. 374-378.

23. Ponyavina, A N. Optical properties of densely packed plasmonic

nanocomposites/ A.N. Ponyavina, E.E.Tselesh, A.D. Zamkovets // *Physics and Chemistry of Solid State*. - 2013. – Vol. 14, № 4. – P. 756-759.

24. Плазмонзависимая модификация спектрально-кинетических свойств тонких пленок фталоцианина меди в присутствии наночастиц серебра/ О.В.Буганов, А.Д. Замковец, А.Н. Понявина, С.А.Тихомиров // *Журнал прикладной спектроскопии*.- 2014. - Т. 81, №1. - С.93-98.

25. Замковец, А.Д. Широкополосные плазмонные поглощающие нанокомпозиты/ А.Д.Замковец // *Оптический журнал*. - 2014. - №6. – С.78-83.

26. Замковец, А.Д. Плазмонный резонанс в планарных слоистых наноструктурах серебро-фталоцианин никеля/ А.Д.Замковец, А.Н. Понявина, Л.В.Баран. // *Известия НАН Беларуси. Серия физико-математическая*.- 2016. - №4.- С.98-105.

27. Спектрально-временная динамика нестационарного поглощения многослойных периодических плазмонных наноструктур/ О.В.Буганов, А.Д.Замковец, А.Н.Понявина,С.А.Тихомиров, Фам Хон Мынь, Нгуен Тан Бынь, Нгуен Дай Хунг // *Известия НАН Беларуси. Серия физ.-мат. наук*. -2017. - №2. – С.82-90.

28. Дынич, Р.А. Оптические свойства гибридных плазмонных нанокомпозитов/ Р.А. Дынич, А.Д.Замковец, А.Н.Понявина // *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. - 2018. - № 2.- С.25-34.

29. Silver Nanoparticle Effect on Spectral-Kinetic Properties of Thin Nickel Phthalocyanine Films/ O. V. Buganov, A. D. Zamkovets, A. N. Ponyavina, S. A. Tikhomirov, M. H. Pham, B. T. Nguyen, H. D. Nguyen// *Plasmonics*. – 2018. - Vol. 13, Iss. 56. – P.1-6.

30. Spectral-kinetic properties of nanosized nickel phthalocyanine films on silver nanoparticle monolayers/ O.V. Buganov, A.D. Zamkovets, A.N. Ponyavina, S.A. Tikhomirov // *Semiconductors*. – 2018. – Vol. 52, No. 14. – P. 1853 – 1856.

31. Концентрационная зависимость полосы плазмонного поверхностного резонанса поглощения наноструктур золота в углеродсодержащих матрицах/ Р.А.Дынич, А.Д. Замковец, А.Н. Понявина, Э.М. Шпилевский// *Известия НАН Беларуси. Серия физ.-мат. наук*. – 2019. - № 2. – С. 332-342.

32. Dependence of a surface plasmon resonance band on concentration of copper nanoparticles in transparent and carbon-bearing matrices/R.A.Dynich, A.D.Zamkovets, A.N.Ponyavina, E.M. Shpilevsky// *International Journal of Nanoscience*. – 2019. – Vol. 18, N. 3&4. – P. 1940029-(1-4).

33. Спектрально-кинетические свойства нестационарного поглощения гибридных наноструктур серебро-фталоцианин меди/ Е.А. Барбарчик, О.В. Буганов, А. Д. Замковец, С.А. Тихомиров, Фан Вьет Тип, Фам Хон Мынь// *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук*.- 2020. – №4. – С. 470-479.

Статьи в других научных изданиях

34. Замковец, А.Д. Оптические свойства планарных плазмонных нанокompозитов Ag-ZnS/ А.Д.Замковец, П.П.Першукевич // Электроника ИНФО. – 2014. - №1. - С.45-48.

35. Замковец, А.Д. Оптические свойства тонких органических пленок, допированных плазмонными наночастицами/ А.Д.Замковец, А.Н. Понявина// Электроника ИНФО. - 2015. - №10. - С.42-45.

Статьи в материалах и сборниках конференций

36. Kachan, S.M. Surface plasmon resonances and light selection in metal-dielectric nanostructures of various spatial arrangement/ S.M. Kachan, A.N. Ponyavina, A.D. Zamkovets // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures / ed. by V.E. Borisenko, S.V. Gaponenko, V.S. Gurin. - Singapore: World Scientific, 2003. - P.151-154.

37. Замковец, А.Д. Резонансное плазменное поглощение в планарных наноструктурах серебра/ А.Д.Замковец, А.Н.Понявина // Нанотехнологии и фотонные кристаллы: мат-лы II межрегион. семинара, Калуга, 15-17 марта 2004 г. – Калуга: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - С.45-49.

38. Шпилевский, Э.М. Оптические свойства наноструктур Au – C₆₀/ Э.М. Шпилевский, А.Д. Замковец. И.И.Васильев // Фуллерены и фуллереноподобные структуры: мат-лы 3 междунар. симпоз., Минск, 22-25 июня 2004 г. – Минск, 2004. - С.131-135.

39. Резонансное плазменное поглощение в тонкопленочных структурах C₆₀ – Cu / Э.М. Шпилевский, А.Д. Замковец, В.И. Прокошин, И.И.Васильев//Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. трудов IV междун. конф., Санкт-Петербург, 5-7 июля 2004 г. - Санкт-Петербург, 2004. - С.100-101.

40. Ponyavina, A.N. Light selection in metal-dielectric nanocomposites of subwavelength layered structure/ A.N. Ponyavina, S.M. Kachan, A.D. Zamkovets // Nanocomposites:Development, Production, Application / ed. by A.A. Berlin, I.G. Assovskiy. –M.: Torus Press, 2004. - P.55-56.

41. Замковец, А.Д. Оптические свойства квазиодномерных тонкопленочных плазмонных наноструктур/ А.Д. Замковец, А.Н.Понявина// Оптика неоднородных структур: мат-лы республ. науч.-практ. конф., Могилев, 4-6 октября 2004 г. – Могилев, 2004. - С.33-37.

42. Ponyavina, A.N. Optical properties nanocomposites Au – C₆₀ / A.N. Ponyavina, A.D. Zamkovets, E.M. Shpilevsky // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures / ed. by V.E. Borisenko, S.V. Gaponenko, V.S. Gurin. -

Singapore: World Scientific, 2005. - P.231-234.

43. Понявина, А.Н. Селекция света в металл-диэлектрических нанокompозитах с субволновой структурой/ А.Н.Понявина, А.Д.Замковец, С.М.Качан // Перспективные материалы и технологии: сборник статей.- М: ТОРУС ПРЕСС, 2005. - Т.2. - С 217-224.

44. Шпилевский, Э.М. Плазмонный резонанс в металл-фуллереновых наноструктурах/ Э.М. Шпилевский, А.Д. Замковец // Актуальные проблемы физики твердого тела: мат-лы междунар. научн. конфер. - Минск, 23-26 октября 2007 г. – Минск, 2007. – Т. 3. – С.95-98.

45. Замковец, А.Д. Спектрально-люминесцентные свойства металлосодержащих наноструктур/ А.Д. Замковец, П.П.Першукевич // Лазерная и оптикоэлектронная техника /Отв. ред. И.С. Манак. - Мн.: Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2008. - Вып.11. - С. 100-105.

46. Качан, С.М. Оптические свойства квазиодномерных биметаллических фотонных кристаллов/ С.М.Качан, А.Н.Понявина, А.Д.Замковец // II конгресс физиков Беларуси: сб. научн. трудов, Минск, 3-5 ноября 2008 г.- Минск, 2008. - С. 88-89.

47. Zamkovets, A.D. Localized surface plasmon enhancement at bimetallic planar nanostructures/ A.D. Zamkovets, A.N. Ponyavina, L.V.Baran // ed. by V.E. Borisenko, S.V. Garonenko, V.S. Gurin. - Singapore: World Scientific, 2009. - P. 180-183.

48. Плазмонный резонанс в наноструктурах полипарафенилен-серебро/ А.Д.Замковец, А.Н.Понявина, Е.И. Аксиментьева, Л.В. Баран // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. междунар. научн. конфер., Минск, 20-23 октября 2009 г. - Минск, 2009. – Т.2. - С.334-336.

49. Динамика электронных возбуждений в металлосодержащих нанокompозитах/ О.В.Буганов, А.Д.Замковец, С.А.Тихомиров, А.Д. Широканов // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. междунар. научн. конфер., Минск, 20-23 октября 2009 г. – Минск . 2009. – Т. 1. - С.296-298.

50. Динамика электронных возбуждений в плазмонных наноструктурах Ag/Na_3AlF_6 при воздействии ультракороткими световыми импульсами/ О.В.Буганов, А.Д.Замковец, А.Н. Понявина, В.В.Сапешко, С.А.Тихомиров // Лазерная Физика и Оптические Технологии: сб. мат. междунар. научн. конф., Минск, 27-30 сентября 2010 г. – Минск, 2010. -Т. 2. - С. 228-231.

51. Шпилевский, Э.М. Особенности проявления плазмонного резонанса в металл-фуллереновых наноструктурах/ Э.М. Шпилевский, А.Д. Замковец, Г.Г.Горох //Вакуумная наука и техника: мат-лы VIII науч.-техн. конф. с участ. зарубеж. специалистов, Судак (Крым), 15-24 сентября 2011 г. -Судак (Крым), 2011. - С. 194 – 197.

52. Плазмон-зависимая модификация спектрально-кинетических свойств

тонких пленок фталоцианина меди в присутствии наночастиц серебра/ О.В.Буганов, А.Д.Замковец, А.Н. Понявина, В.В.Сапешко, С.А.Тихомиров // IV Конгресс физиков Беларуси: материалы конгресса, Минск, Беларусь, 24–26 апреля 2013 г. – Минск, 2013. - С. 225-226.

53. Понявина, А.Н. Оптические свойства планарных плотноупакованных плазмонных нанокомпозитов/ А.Н.Понявина, А.Д.Замковец, Е.Е.Целеш // IV Конгресс физиков Беларуси: материалы конгресса, Минск, Беларусь, 24–26 апреля 2013 г. – Минск, 2013. - С. 249-250.

54. Ponyavina, A.N. Surface plasmon resonance of absorption at densely packed plasmonic nanocomposites/ A.N. Ponyavina, A.D. Zamkovets, E. E. Tselesh // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures / ed. by V.E. Borisenko, S.V. Gaponenko, V.S. Gurin. - Singapore: World Scientific, 2013. - P. 94-97.

55. Замковец, А.Д.Спектрально-селективные свойства плазмонных нанокомпозитов / А.Д.Замковец, А.Н.Понявина // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. междунар. научн. конфер., Минск, 15-18 октября 2013 г. – Минск, 2013. – Т. 3. – С.272-273.

56. Диэлектрические свойства плазмонных металлофуллереновых нанокомпозитов/ А.Д. Замковец, А.Н. Понявина, Е.Е.Целеш, Э.М.Шпилевский // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах: мат-лы VIII междунар. конф., Минск, 8-10 октября 2014 г. – Минск, 2014. - С.216-222.

57. Zamkovets, A.D. Spectral properties of layered nanocompounds of silver-copper phthalocyanine/ A.D. Zamkovets, A.N. Ponyavina // Modern Applications of Nanotechnologies: Proceedings of the 2nd Intern. Conf., Minsk, Belarus, 6-8 May, 2015. – P088-1-3.

58. Замковец, А.Д. Плазмонный резонанс в планарных нанокомпозитах ZnS-Ag/ А.Д. Замковец // V конгресс физиков Беларуси: сб. научных трудов конгресса, Минск, 27-30 октября 2015 г. – Минск, 2015. – С. 207-208.

59. Спектральное проявление плазмонного резонанса в металл-фуллереновых наноструктурах/ Э.М. Шпилевский, М.Э. Шпилевский, А.Д. Замковец, С.А.Филатов, Г. Шилагарди // Вакуумная техника, материалы и технологии: в сб. материалов 10-й междунар. научно-технич. конф., Москва, 14-16 апреля 2015 г. - М.: НОВЕЛЛА, 2015. - С.170-175.

60. Замковец, А.Д. Плазмонный резонанс в слоистых нанокомпозитах серебро-фталоцианин никеля/ А.Д. Замковец, А.Н. Понявина // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. междунар. научн. конф., Минск, 22-25 ноября 2016 г. – Минск: Ковчег, 2016. - Т. 3 - С.65 - 67.

61. Понявина, А.Н. Влияние конструктивных параметров на спектральные характеристики гибридных нанокомпозитов/ А.Н.Понявина, А.Д.Замковец // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. междунар. научн. конф., Минск, 22-25 ноября 2016 г. – Минск: Ковчег, 2016. - Т. 3 - С.137-139.

62. Буганов, О.В. Спектрально-временная динамика нестационарного поглощения наноструктурированных материалов/ О.В.Буганов, А.Д.Замковец, С.А. Тихомиров // Взаимодействие излучений с твердым телом: сб. материалов 12-й междунар. конф., Минск, 19-22 сентября 2017 г. – Минск, 2017. - С. 38-40.

63. Дынич, Р.А. Оптические свойства гибридных плазмонных нанокомпозитов/Р.А. Дынич, А.Д. Замковец, А.Н. Понявина // Квантовая электроника 2017: сб. матер. XI междунар. научно-практич. конф., Минск, 13-17 ноября 2017 г. – Минск, 2017. - С. 49-50.

64. Замковец, А.Д. Разработка наноструктурированных материалов с цилиндрическими роллами/ А.Д. Замковец, А.Н. Понявина //Квантовая электроника 2017: сб. матер. XI междунар. научно-практич. конф., Минск, 13-17 ноября 2017 г. – Минск, 2017. - С. 236-237.

65. Дынич, Р.А. Модификация спектральных свойств поглощающей тонкопленочной матрицы наночастицами серебра/ Р.А.Дынич, А.Д. Замковец, А.Н. Понявина //Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докладов VIII междунар. научн. конф., Минск, 24-28 сентября 2018 г. – Минск, 2018. - Т.2.- С. 243 – 245.

66. Влияние поглощения в углеродсодержащей матрице на плазмонный резонанс наноструктур золота/ Р.А.Дынич, А.Д. Замковец, А.Н. Понявина, Э.М. Шпилевский // Наноструктуры в конденсированных средах: сб. научных статей X-й междунар. научн. конф. «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах», Минск, 20-23 августа 2018 г. - Минск, 2018. - С. 195-200.

Тезисы докладов

67. Замковец, А.Д. Оптические свойства тонкопленочных металл-диэлектрических нанокомпозитов/ А.Д. Замковец, А.Н. Понявина //Физика и технология тонких пленок: сб. тез. 9-й междунар. конф., И.-Франковск, 19- 24 мая 2003 г. – И.-Франковск, 2003. - С. 235-236.

68. Замковец, А.Д. Электродинамические взаимодействия и оптические спектры плазменного поглощения в планарных наноструктурах серебра и меди/ А.Д. Замковец, А.Н. Понявина // Фундаментальные проблемы оптики: труды 3 междунар. конф., С.-Петербург, 18-21 октября 2004 г. - С.-Петербург, 2004. - С.93-94.

69. Шпилевский, Э.М. Резонансное плазмонное поглощение в металл-фуллереновых наноструктурах/ Э.М. Шпилевский, А.Д. Замковец, И.И. Васильев // Наноразмерные системы. Электронное, атомное строение и свойства: сб. междунар. конф., г.Киев, Украина, 12-18 октября 2004 г.- Киев, 2004. – С.135.

70. Замковец, А.Д. Частотная локализация и делокализация резонансов поверхностного плазменного поглощения в планарных наноструктурах серебра/ А.Д. Замковец, А.Н. Понявина // Физика и технология тонких пленок: сб. матер. 10-й междунар. конф., И.-Франковск, Украина, 16-21 мая 2005 г. – И.-Франковск, 2005. – Т.2. - С. 21-22.

71. Замковец, А.Д. Спектрально-люминесцентные свойства плазмонных наноконпозитов/ А.Д. Замковец, П.П.Першукевич // Наноструктурные материалы -2008. Беларусь–Россия-Украина: сб. матер. 1-й междунар. науч. конф., Минск, 22-25 апреля 2008 г. – Минск, 2008. - С. 584.

72. Понявина, А.Н. Концентрационное усиление сенсорной чувствительности металлосодержащих наноструктур/А.Н. Понявина, А.Д.Замковец, С.М.Качан // Наноструктурные материалы -2008. Беларусь–Россия-Украина: сб. матер. 1-й междунар. науч. конф., Минск, 22-25 апреля 2008 г. – Минск, 2008. - С. 36.

73. Zamkovets, A.D. High sensing potential of self-assembled metal nanostructures// A.D. Zamkovets, S.M.Kachan, A.N. Ponyavina // Sensors Electronics and Microsystems Technology: Abstracts of 3 Intern. Conf., Ukraine, Odessa, June 2-6, 2008. - Odessa. - С.146.

74. Замковец, А.Д. Спектрально-люминесцентные свойства металлосодержащих наноструктур/ А.Д. Замковец, П.П.Першукевич // Квантовая электроника 2008: сб. VII междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13-16 ноября 2008 г. – Минск, 2008. - С. 51.

75. Замковец, А.Д. Усиление плазмонных резонансов в планарных наноструктурах Cu/Ag/ А.Д. Замковец, А.Н. Понявина, Л.В.Баран // Физика и технология тонких пленок и наноструктур: сб. матер. 12-й междунар. конф., И.-Франковск, Украина, 18-23 мая 2009 г. - И.-Франковск, 2009, Т. 2. - С. 53-54.

76. Буганов, О.В. Динамика электронных возбуждений в слоистых плазмонных наноконпозитах Ag/SiO/ О.В.Буганов, А.Д.Замковец, С.А. Тихомиров // Физика и технология тонких пленок и наноструктур: сб. матер. 12-й междунар. конф., И.-Франковск, Украина, 18-23 мая 2009 г. - И.-Франковск, 2009. - Том 2. - С. 31.

77. Plasmon resonance in nanostructures based on poly(paraphenylene)— silver monolayers/ A.D. Zamkovets, A.N. Ponyavina, O.I. Aksimentyeva, L.V.Baran // Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials: Abstracts of 8-th Internat. Conf., Ivano-Frankivsk, Ukraine, May 17-22, 2010. - Publ. by Kyiv: Naukovyi Svit, 2010. - P. 59-60.

78. Electron excitation dynamics at plasmonic nanostructures with dense packing and subwavelength periodicity/ O.V. Buganov, A.D. Zamkovets, A.N. Ponyavina, S.A. Tikhomirov // Coherent and Nonlinear Optics. Lasers, Applications and Technologies: Abstracts of Intern. Conf. ICONO/LAT, August 23-26, 2010. - Kazan:

Technical digest, 2010. – P. IThO20.

79. Замковец, А.Д. Спектрально-селективные свойства планарных плазмонных нанокompозитов в видимом и ближнем ИК диапазонах /А.Д. Замковец, А.Н. Понявина // Квантовая электроника 2010: матер.VIII междунаучно-технич. конф., Минск, 22-25 ноября 2010 г. – Минск: Изд. центр БГУ, 2010. - С.45.

80. Модификация спектров поглощения пленок органических полупроводников при их допировании плазмонными наночастицами/ В.Н.Богач, Р.А.Дынич, А.Д.Замковец, А.Н.Понявина // Квантовая электроника 2010: матер.VIII междунаучно-технич. конф., Минск, 22-25 ноября 2010 г. – Минск: Изд. центр БГУ. - С.177.

81. Zamkovets, A.D. Spectra-luminescent properties of plasmonic nanocomposites at a low-intensive lamp excitation/ A.D.Zamkovets, P.P.Pershukevich // Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems: mater. of XIII Intern. Conf., Iv.-Frankivsk, Ukraine, 16-21 May, 2011. - Iv.Frankivsk, 2011. – Vol. 2. - P.234.

82. Modification of absorption spectra of organic semiconductor thin films doped with plasmonic nanoparticles/ V.N.Bogach, R.A.Dynich, A.D.Zamkovets, A.N.Ponyavina // Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems: mater. of XIII Intern. Conf., Iv.-Frankivsk, Ukraine, 16-21 May, 2011. - Iv.Frankivsk, 2011. – Vol. 1. – P. 19.

83. Дынич, Р.А. Эффекты ближнего поля в органических полупроводниковых матрицах при их допировании плазмонными наночастицами/ Р.А. Дынич, А.Д. Замковец, А.Н. Понявина // Физика полупроводников: сб. тез. 5-й Украинской научной конф. с участием зарубежных специалистов, Ужгород, Украина, 9-15 октября 2011 г. - Ужгород, 2011. - С. 132-133.

84. Замковец, А.Д. Спектральные свойства слоистых нанокompозитов серебро-фталоцианин меди/ А.Д. Замковец, А.Н. Понявина // Наноструктурированные материалы – 2012. Россия - Украина – Беларусь: сб. тез. III междунар. научн. конф., Петербург, Россия, 19–22 ноября 2012 г. - Петербург, 2012. - С. 111.

85. Zamkovets, A.D. Multilayer plasmonic absorbing nanocomposites/ A.D. Zamkovets, A.N. Ponyavina // Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems: mater. of XIV Intern. Conf., Iv.-Frankivsk, Ukraine, 20 -25 May, 2013. - Iv.Frankivsk, 2013. – P. 330.

86. Ponyavina, A N. Optical properties of densely packed plasmonic nanocomposites/ A N. Ponyavina, E.E. Tselesh, A.D. Zamkovets // Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems: mater. of XIV Intern. Conf., Iv.-Frankivsk, Ukraine, 20 -25 May, 2013. - Iv.Frankivsk, 2013. – P. 355.

87. Оптические свойства плазмонных металлофуллереновых нанокompозитов/ А.Д. Замковец, А.Н. Понявина, Е.Е.Целеш, Э.М.Шпилевский // Физика полупроводников: сб. тез. VI Украинской научной конф. с участием зарубежных специалистов, Черновцы, Украина, 30 сентября-4 октября 2013 г. – Черновцы, 2013. - С. 347.

88. Спектрально-кинетические свойства нанокompозитов серебро-фталоцианин меди/ О.В.Буганов, А.Д. Замковец, А.Н. Понявина, С.А.Тихомиров // Физика полупроводников: сб. тез. VI Украинской научной конф. с участием зарубежных специалистов, Черновцы, Украина, 30 сентября-4 октября 2013 г. – Черновцы, 2013. - С. 72.

89. Замковец, А.Д. Оптические свойства планарных плазмонных нанокompозитов Ag-ZnS/ А.Д.Замковец, П.П.Першукевич // Квантовая электроника 2013: матер. IX междунар. научно-технич. конф., Минск, 18-21 ноября 2013 г. – Минск: Изд. центр БГУ, 2013. - С.177.

90. Плазмонзависимая модификация нестационарного поглощения многослойных наноструктур серебро-фталоцианин меди/ О.В.Буганов, А.Д. Замковец, А.Н. Понявина, С.А.Тихомиров // Наноструктурные материалы 2014. Беларусь – Россия-Украина: сб. матер. IV-й междунар. научн. конф., Минск, 7-10 октября 2014 г. – Минск, 2014. - С. 114.

91. Шпилевский, Э.М. Плазмонное резонансное поглощение в структурах металл-фуллерен C₆₀ / Э.М. Шпилевский, А.Д. Замковец, Г.Г. Горох. // VII съезд Российского Фотобиологического Общества: материалы съезда, п. Шепси, 14-20 сентября 2014 г. – Шепси, Россия, 2014. - С. 94.

92. Замковец, А.Д. Спектральные свойства тонких органических пленок, допированных плазмонными наночастицами/ А.Д.Замковец, А.Н. Понявина // Квантовая электроника 2015: матер. X междунар. научно-технич. конф., Минск, 9-13 ноября 2015 г. – Минск, 2015. - С. 30.

Патенты

93. Замковец, А.Д. Светопоглощающее многослойное покрытие/А.Д. Замковец, С.М.Качан, А.Н.Понявина // Патент ВУ 12594. – Опубл. 30.10.2009.

94. Замковец, А.Д. Светопоглощающее покрытие/ А.Д. Замковец, С.М.Качан, А.Н.Понявина // Патент RU 2370797. - 20.09.2009.

РЕЗЮМЕ**Замковец Анатолий Дмитриевич****Резонансные взаимодействия оптического излучения с плазмонными наноструктурами и слоистыми средами**

Ключевые слова: поверхностный плазмонный резонанс, плотноупакованные монослои наночастиц, электродинамические взаимодействия, плазмонно-фотонные наноструктуры.

Цель работы: установление механизмов и закономерностей резонансного взаимодействия оптического излучения с плотноупакованными монослоями плазмонных наночастиц, а также со слоистыми структурами, характеризующимися наличием плазмонных резонансов и субволновой периодичности, как основы новых типов функциональных нано- и микроструктурированных материалов для оптических, оптоэлектронных и инфокоммуникационных применений.

Методы исследования: термическое осаждение в вакууме, методы стационарной и нестационарной спектроскопии, электронной и атомно-силовой микроскопии, люминесценции, численные методы.

Основные результаты и их новизна. Установлено, что варьирование условий электронного ограничения в 2D-наноструктурах с поверхностным плазмонным резонансом поглощения позволяет управлять их спектрами пропускания и отражения в видимом диапазоне, а регулирование условий межслойной интерференции – характеристиками многослойных плазмонно-фотонных систем. Установлено, что собственное поглощение в фуллереновой матрице ослабляет электродинамические взаимодействия между плазмонными наночастицами в плотноупакованных наноструктурах. Показано, что наличие наночастиц серебра в гибридных структурах Ag-CuPc, Ag-NiPc усиливает эффективное поглощение пленки органического полупроводника. Обнаружена плазмон-зависимая модификация спектрально-кинетических свойств тонких пленок фталоцианина меди в присутствии наночастиц серебра при их возбуждении фемтосекундными импульсами. Поверхностное плазмонное поглощение и межслойная интерференция использованы для создания широкополосных поглощающих антиотражающих покрытий и фильтров для видимой и ближней ИК областей спектра. Разработаны новые методы создания отрезающих коротковолновых фильтров для терагерцового диапазона.

Рекомендации по использованию и область применений. Полученные результаты можно использовать в нанофотонике, оптоэлектронике и инфокоммуникациях, в материаловедении, лазерной физике, биологии и медицине, при разработке селективных спектральных элементов, а также оптических сенсоров.

РЭЗІЮМЭ**Замкавец Анато́ль Дзмі́трыевіч****Рэзанансныя ўзаемадзеі аптычнага выпраменьвання
з плазмоннымі нанаструктурамі і пластовымі асяроддзямі**

Ключавыя словы: паверхневы плазмонны рэзананс, шчыльнаўпакаваныя манаслаі наначасцінак, электрадынамічныя ўзаемадзеі, плазмонна-фатонныя нанаструктуры.

Мэта работы: устанаўленне механізмаў і заканамернасцей рэзананснага ўзаемадзеяння аптычнага выпраменьвання з шчыльнаўпакаванымі манаслаямі плазмонных наначасцінак, а таксама з пластовымі структурамі, якія характарызуюцца наяўнасцю плазмонных рэзанансаў і субхвалевай перыядычнасці, як асновы новых тыпаў функцыянальных нана- і мікраструктураваных матэрыялаў для аптычных, оптаэлектронных і інфакамуніцыйных прымяненняў.

Метады даследавання: тэрмічнае асаджэнне ў вакууме, метады стацыянарнай і нестацыянарнай спектраскапіі, электроннай і атамна-сілавой мікраскапіі, люмінесцэнцыі, лікавыя метады.

Асноўныя вынікі і іх навізна. Устаноўлена, што вар'іраванне ўмоў электроннага абмежавання ў 2D-нанаструктурах з паверхневым плазмонным рэзанансам паглынання дазваляе кіраваць іх спектрамі прапускання і адлюстравання ў бачным дыяпазоне, а рэгуляванне ўмоў міжслаевой інтэрферэнцыі – характарыстыкамі шматслойных плазмонна-фатонных сістэм. Устаноўлена, што ўласнае паглыннанне ў фулерэнавай матрыцы аслабляе электрадынамічныя ўзаемадзеянні паміж плазмоннымі наначасцінкамі ў шчыльнаўпакаваных нанаструктурах. Паказана, што наяўнасць наначасцінак срэбра ў гібрыдных нанаструктурах Ag-CuPc, Ag-NiPc узмацняе эфектыўнае паглыннанне пленкі арганічнага паўправадніка. Выяўлена плазмон-залежная мадыфікацыя спектральна-кінетычных уласцівасцяў тонкіх пленак фталацыяніна медзі ў прысутнасці наначасцінак срэбра пры іх узбуджэнні фемтасекунднымі імпульсамі. Паверхневае плазмоннае паглыннанне і міжслаевая інтэрферэнцыя выкарыстаны для стварэння шырокапалосных паглынальных антыадбівальных пакрыццяў і фільтраў для бачнай і блізкай ІЧ абласцей спектру. Распрацаваны новыя метады стварэння адразуючых кароткахвалевых фільтраў для тэрагерцовага дыяпазону.

Рэкамендацыі па выкарыстанню і вобласць прымянення. Атрыманыя вынікі можна выкарыстоўваць у нанафатоніцы, оптаэлектроніцы і інфакамунікацыях, у матэрыялазнаўстве, лазернай фізіцы, біялогіі і медыцыне, пры распрацоўцы селектыўных спектральных элементаў, а таксама аптычных сэнсараў.

SUMMARY**Zamkavets Anatoly Dmitrievich**
Resonant interactions of optical radiation
with plasmonic nanostructures and layered media

Keywords: surface plasmon resonance, close-packed monolayers of nanoparticles, electrodynamic interactions, plasmon-photonic nanostructures.

Aim of research: establishing of mechanisms and regularities of the resonant interaction of optical radiation with close-packed monolayers of plasmonic nanoparticles and layered structures characterized by the presence of plasmon resonances and subwave periodicity, as the basis for new types of functional nano- and microstructured materials for optical, optoelectronic and infocommunication applications.

Research methods: thermal vacuum evaporation, methods of stationary and non-stationary spectroscopy, electron and atomic force microscopy, luminescence, numerical methods.

The results obtained and their novelty: It has been established that varying the conditions of electronic confinement in fabricated 2D-nanostructures with surface plasmon absorption resonance makes it possible to control their transmission and reflection spectra in the visible range, and the regulation of interlayer interference conditions - the characteristics of multilayer plasmon-photonic systems. It is found that intrinsic absorption in the fullerene matrix weakens the electrodynamic interactions between plasmonic nanoparticles in close-packed nanostructures. It is shown that the presence of silver nanoparticles in hybrid structures Ag-CuPc, Ag-NiPc enhances the effective absorption of the organic semiconductor film. A plasmon-dependent modification of the spectral-kinetic properties of thin copper phthalocyanine films in the presence of silver nanoparticles upon their excitation by femtosecond pulses has been found. Surface plasmon absorption and interlayer interference have been used to create broadband absorbing antireflection coatings and filters for the visible and near-IR spectral regions. New methods have been developed for creating cut-off short-wave filters for the terahertz range.

Recommendations for use and application fields. The results obtained can be used in nanophotonics, optoelectronics and infocommunications, in materials science, laser physics, biology and medicine, in the development of selective spectral elements, as well as optical sensors.

ЗАМКОВЕЦ
Анатолий Дмитриевич

РЕЗОНАНСНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ С ПЛАЗМОННЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ
И СЛОИСТЫМИ СРЕДАМИ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – Оптика



Подписано в печать 19.10.2022 г. Формат 60x90 1/16.
Бумага офисная. Печать: ризография.
Печ. л. 3.0. Учетн.-изд. л. 2.7.
Тираж 60 экз. Заказ № 11.

Государственное научное учреждение «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
ИМЕНИ Б.И. СТЕПАНОВА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
БЕЛАРУСИ»

220072, г. Минск, пр. Независимости, 68-2.

Отпечатано на ризографе ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси