

На правах рукописи



ГАЙДУК Алексей Евгеньевич

МУЛЬТИРЕЗОНАНСНЫЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ НА
ОСНОВЕ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: **Принц Виктор Яковлевич**
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией.

Официальные оппоненты: **Макаров Сергей Владимирович**
доктор физико - математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», главный научный сотрудник, профессор.

Герасимов Василий Валерьевич
кандидат физико - математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник.

Ведущая организация: Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»

Защита состоится «14» сентября 2021 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 на базе *Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук*, расположенного по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук: <https://www.isp.nsc.ru/obrazovanie/dissertatsionnyj-sovet/zasedaniya/gajduk-aleksej-evgenevich>.

Автореферат разослан « » 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д. ф. - м. н.

Погосов Артур Григорьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время активно ведётся поиск методов усиления взаимодействия электромагнитного излучения с веществом. В последнее десятилетие значительное развитие получили метаповерхности, представляющие собой искусственные структурированные электромагнитные среды с толщиной менее длины волны, составленные из резонансных элементов [1,2]. Они позволяют контролировать амплитуду пропускания, отражения, направление распространения и поляризацию электромагнитного излучения [3]. Разработки на основе метаповерхностей структур, в которых возможно перекрытие резонансов, перспективны для получения новых эффектов, которые невозможно получить при помощи однорезонансных систем. Создание поляризационно-чувствительных систем, в том числе динамически переключаемых, необходимо для решения задач передачи информации, дистанционного зондирования для обнаружения искусственных объектов на фоне природных и для ряда медицинских приложений, например, диагностики пораженных тканей.

К другой активно исследуемой области относятся плазмонные наноструктуры и метаповерхности. Плазмонные системы [4] позволяют локализовывать и многократно усиливать электрические поля, что обуславливает их эффективность для задач управления электромагнитным излучением. Активно разрабатываются оптические системы обработки информации, в которых носителем выступают фотоны. Ожидается, что рабочие частоты таких устройств будут на несколько порядков больше, чем у существующих наноэлектронных аналогов [5]. Наличие в системе нескольких типов электромагнитных резонансов значительно расширяет возможности управления излучением. Спектральное и пространственное перекрытие резонансов может, как усиливать отклик структуры, так и приводить к качественно новым эффектам [6,7], например, резонансу Фано [8], который обладает резким асимметричным профилем и крайне чувствителен к изменению диэлектрического окружения. Исследование мультрезонансных структур актуально для разработки сверхчувствительных сенсоров, усиления нелинейных процессов, управления спектральной шириной полосы пропускания оптических приборов. Ожидается, что системы с перекрывающимися резонансами будут перспективны для решения проблемы динамического управления излучением. Например, с включением материалов с фазовым переходом типа «полупроводник-металл», таких как, диоксид ванадия, магнитооптических материалов, графена, веществ с гигантской керровской нелинейностью. Для решения многих задач управления излучением необходимо исследование мультрезонансных систем на основе метаповерхностей, что является актуальной задачей.

Цель диссертационной работы

Формирование, изучение и дизайн метаповерхностных поляризационных систем со спектрально перекрывающимися электромагнитными резонансами.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие основные задачи:

1. Экспериментальными и численными методами исследовать влияние электромагнитных резонансов и их перекрытия на оптическую активность металл-диэлектрических СВЧ и ТГц-метаповерхностей на основе периодических массивов спиралей.
2. Исследовать спектральные и поляризационные свойства многоуровневых металл-диэлектрических метаповерхностей оптического диапазона, изготовленных методами наноимпринт-литографии.
3. Исследовать взаимодействие локализованных и бегущих плазмонов в новых двухуровневых системах на основе решёточных метаповерхностей.
4. Разработать дизайн динамически перестраиваемых метаповерхностных поляризационных систем с использованием материалов с изменяемой диэлектрической проницаемостью и проводимостью.

Методология и методы исследования:

Для решения поставленных задач использовалось численное моделирование электромагнитных характеристик структурированных резонансных материалов. На основе полученных спектров делались выводы о процессах, протекающих в исследуемых объектах. Большинство расчётных результатов сравнивалось с экспериментальными данными, полученными методами спектральной эллипсометрии оптического диапазона, спектроскопии, терагерцовых и СВЧ-измерений.

Научная новизна

1. Экспериментально и численно получены зависимости спектральных свойств многослойных субволновых плазмонных решеток с ультратонкой металлизацией от глубины рельефа и угла падения света. Установлено влияние спектрального перекрытия резонансов типа Фабри-Перо, плазмонов и дифракционных аномалий на поляризационные спектры структур. Проведено комплексное исследование и характеристика топологических и оптических свойств решеток, изготовленных методом наноимпринт-литографии.
2. Исследованы механизмы взаимодействия локализованных и бегущих плазмонов в поляризационных системах, работающих как на отражение, так и на пропускание. Впервые изучено влияние плазмонного взаимодействия на модуляцию оптического отклика системы на основе гиротропного материала.

3. Установлены физические механизмы усиления оптической активности в системах на основе гибридных метаповерхностей, образованных ленточными спиралями, а также полувитковыми квазиспиралями.

Практическая значимость диссертационной работы

Представленные результаты имеют как фундаментальное, так и прикладное значение, на их основе могут быть созданы новые устройства и системы управления поляризацией электромагнитного излучения. В работе изучены оптические свойства высокоаспектных металл-полимерных нанорешеточных метаповерхностей, в том числе с ультратонкой металлизацией, которые перспективны в качестве спектральных и поляризационных фильтров инфракрасного и видимого диапазонов. Предложенные и исследованные метаматериалы с взаимодействующими плазмонами предназначены для решения задач фильтрации и усиления отклика гиротропных структур. Исследовано влияние резонансов подложки на оптическую активность гибридных киральных метаповерхностей на основе двухслойных массивов ленточных спиралей и полувитковых квазиспиралей. Полученные результаты перспективны для создания высокоэффективных поляризационных систем и круговых поляризаторов.

Научные положения выносимые на защиту

1. При оптимальном выборе параметров в двухуровневой метаповерхности «периодическая решетка металлических нанополос - периодический массив плазмонных наночастиц» формируются две гибридные плазмонные моды, обусловленные спектральным и пространственным перекрытием бегущего и локализованного плазмонов.

2. В новых трёхмерных системах, представляющих собой двухуровневые ленточные спирали, расположенные на диэлектрической подложке, максимумы угла поворота плоскости поляризации прошедшего излучения определяются спектральным перекрытием λ -резонансов в спиралях, волноводных резонансов и резонансов типа Фабри-Перо в подложке.

3. Переход от системы двухуровневых металл-диэлектрических нанорешеточных поляризаторов к четырехуровневым приводит к увеличению коэффициента экстинкции в ИК-диапазоне на порядок при сохранении высокого уровня пропускания. В видимой области спектра данные поляризаторы блокируют пропускание вследствие возбуждения локализованных плазмонов и собственного поглощения в нанополосках.

Достоверность

В рамках данной диссертационной работы применялось численное моделирование в коммерчески доступных программных пакетах CST

Microwave Studio и ANSYS HFSS, которые хорошо зарекомендовали себя для решения задач электродинамики. Большинство результатов было подтверждено экспериментально.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертационной работе, были получены автором лично или при его участии. Содержание диссертационной работы и защищаемые положения, отражают личный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами; вклад диссертанта был определяющим.

Апробация диссертационной работы

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

Фотоника (Новосибирск, 2015), 24th Int. Symp. \Nanostructures: Physics and Technology (Санкт-Петербург, 2016), Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), International Conference of Young Specialists (р. Алтай, 2016, 2019, 2020), XIX Ежегодная молодежная конференция с международным участием ИБХФ РАН-вузы "биохимическая физика", III симпозиум "Современное материаловедение" (Москва, 2019), 22-я всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 2020).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них 7 публикаций в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, включая 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и конкретные задачи исследования, а также защищаемые положения.

В первой главе содержится обзор современных достижений в области управления электромагнитным излучением. Основной акцент сделан на искусственных структурированных средах и областях их применения. Рассматриваются различные концепции резонансных электромагнитных систем на основе метаповерхностей, в том числе для задач динамического управления излучением.

Вторая глава посвящена описанию результатов исследования металл-диэлектрических нанорешеточных метаповерхностей, изготовленных методами наноимпринт-литографии. Выполнен краткий обзор литературы, посвященный явлениям в субволновых решётках, включая плазмонные резонансы в периодических наноструктурах.

Экспериментально и с помощью численного моделирования исследованы поляризационно-оптические характеристики субволновых высокоаспектных гибридных периодических наноструктур. Для того чтобы выяснить природу спектральных зависимостей в диссертационной работе использовалась следующая стратегия: выполнялось численное моделирование процессов отражения и пропускания исследуемых систем. Анализ зависимости полученных спектров от геометрических параметров структур (период, глубина рельефа, фактор заполнения) позволил установить природу резонансов, обуславливающих особенности в спектрах. Это позволило интерпретировать экспериментальные данные и указать на возможные способы управления поляризационными характеристиками структур.

Диссертационная работа начиналась с исследования электромагнитных процессов в субволновых решётках т.е. периодических структурах, период которых меньше длины волны света, с которым они взаимодействуют. Такие структуры являются простейшими метаповерхностями, и в литературе получил распространение термин «решёточная метаповерхность». Исследуемые объекты представляли собой диэлектрические решетки из полимера с показателем преломления 1.5, периодом 180 нм, глубиной рельефа 140-160 нм, шириной канавок 80 нм и толщиной золотой металлизации 7-50 нм. В расчётных и экспериментальных спектрах в диапазоне 250-2000 нм выявлены локализованные плазмонные резонансы, рэлеевские аномалии, резонансы типа Фабри-Перо и проанализировано их влияние на оптические свойства. Показано, что отражения внутри решёточного слоя приводят к резонансу типа Фабри-Перо, который проявляется в виде модуляции коэффициента отражения в зависимости от глубины рельефа. В окрестности плазмонных резонансов и рэлеевских аномалий наблюдается дополнительный набег фазы, который приводит к сдвигу положений резонанса типа Фабри-Перо. Результаты численных расчётов были проверены в эксперименте. Для этого были изготовлены структуры с помощью наноимпринт-литографии и последующей металлизацией. Период структуры и глубина рельефа составили 180 нм и 155 нм соответственно, площадь образцов достигала 180 см^2 . Измерения на атомно-силовом микроскопе показали, что параметры рельефа воспроизводятся по всему образцу с высокой точностью. Четырёхслойная сэндвич-структура была реализована путем соединения двух двухслойных решеток с помощью полимерного слоя SU-8 (Рисунок.1а). Изготовленная структура является гибкой и защищена от внешних воздействий полимерными слоями. Экспериментально измеренные спектры пропускания показали, что при длине волны света 700 нм и более происходит подавление ТЕ-волны. Коэффициент пропускания ТМ-волны составил >0.7 для двухслойного и >0.6 для четырехслойного поляризаторов в ближнем инфракрасном диапазоне (Рисунок. 1б,в).

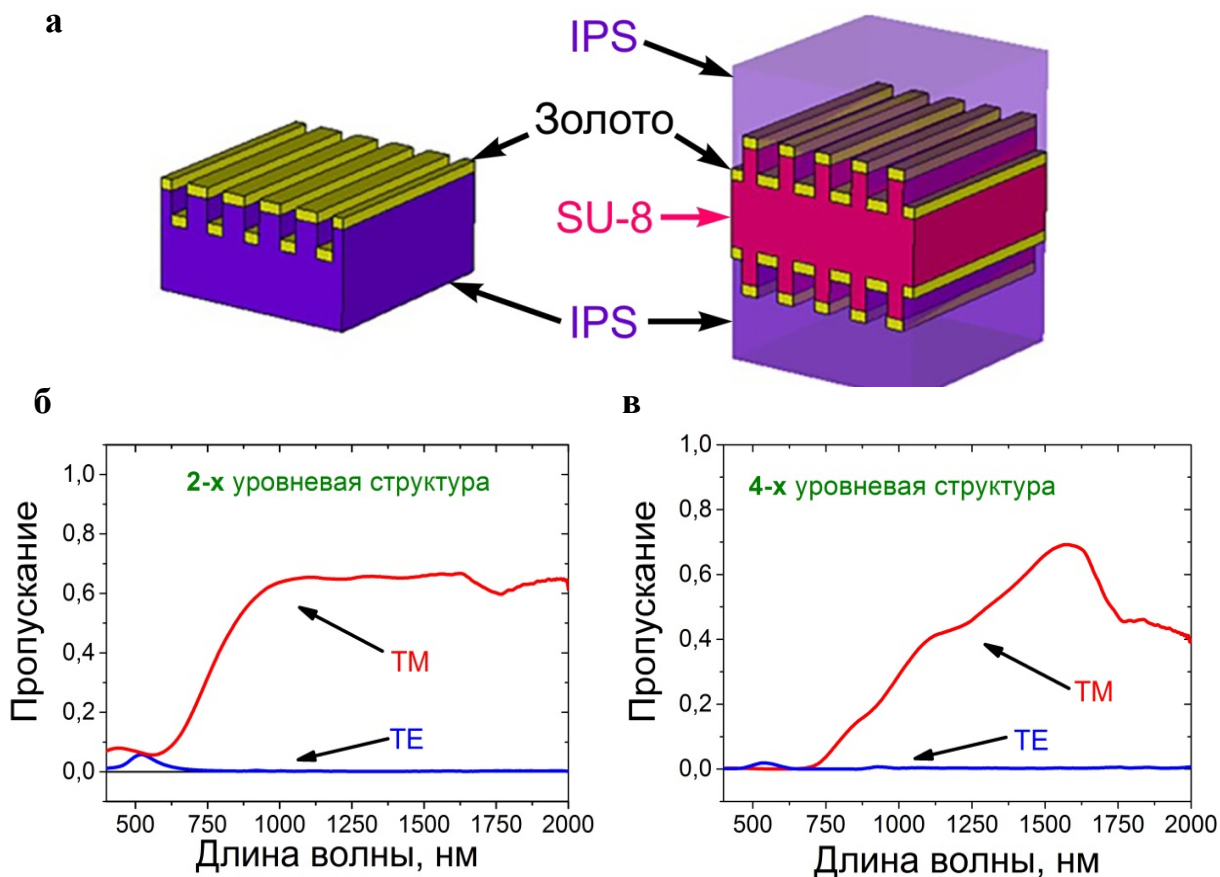


Рисунок.1. а) Геометрия многослойных нанорешеточных поляризаторов
 Экспериментально измеренные спектры пропускания б) двухуровневого и
 в) четырёхуровневого поляризаторов, сформированного из двух
 метаповерхностей.

В области 550-650 нм коэффициент прохождения ТМ-волны близок к нулю. Именно в этой области спектра ТМ-волна возбуждает в золотых полосках локализованный плазмонный резонанс, который приводит к поглощению света и проявляется в виде провала в спектре пропускания. Таким образом, структуры действуют как фильтры, блокирующие прохождение видимого света в диапазоне 400-700 нм. Измерения коэффициента экстинкции (отношение интенсивностей прошедших ТМ и ТЕ-волн) были проведены на длине волны 1550 нм и составили 34 дБ и 45 дБ для двухслойной и четырехслойной структур соответственно.

Рассмотренная выше двухуровневая решётчатая метаповерхность была модифицирована путём добавления отражающего слоя в виде оптически непрозрачной плёнки золота толщиной 100 нм, играющей роль рефлектора. Толщина поверхностной металлизации была выбрана равной 30 нм (Рисунок 2). Такая структура предназначена для работы в качестве отражательного светового фильтра видимого и ближнего инфракрасного диапазонов благодаря возможности управлять перекрытием плазмонного

резонанса в нижнем уровне золотых полос и резонанса типа Фабри-Перо в решёточном слое.

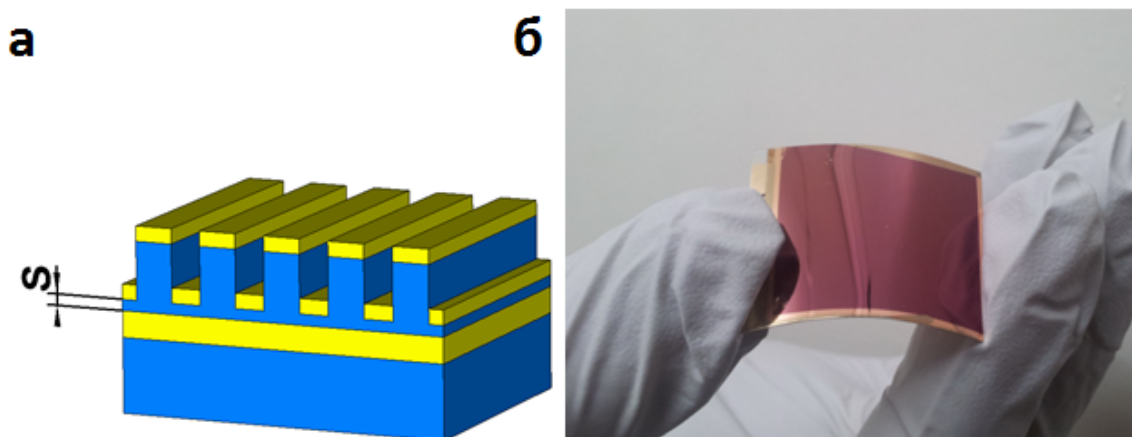


Рисунок 2. а) Геометрия оптического фильтра на основе гибридной субволновой решетки. б) Внешний вид образца, изготовленного методом наноимпринт-литографии.

Третья глава посвящена исследованию электромагнитных свойств структур на основе наночастиц и металлических нанорешеточных метаповерхностей с взаимодействующими плазмонами.

Многослойные плазмонные структуры позволяют добиваться качественно новых физических эффектов благодаря взаимодействию плазмонных резонансов, возбуждаемых в различных элементах структуры. Известно, что наличие плазмонных частиц над металлической плёнкой может приводить к взаимодействию бегущего и локализованного плазмонов [9]. В результате происходит интерференция двух волновых процессов, проявляющаяся в спектрах в виде асимметричного резонанса Фано [10]. Такие структуры обладают низким коэффициентом пропускания вследствие поглощения в металлической плёнке, поэтому эффекты перекрытия резонансов наблюдаются в спектрах отражения. Для многих практических приложений, прежде всего, сенсоров, необходимы структуры, работающие на пропускание. В диссертационной работе была предложена и исследована система, «периодический массив плазмонных наночастиц – плазмонная решетка, поддерживающая экстраординарное оптическое пропускание» (Рисунок 3а), работающая на пропускание. Структура представляет периодический (370x300 нм) массив серебряных наночастиц, расположенных на расстоянии 30 нм над серебряной решеткой с узкими щелями (50 нм). Перекрытие бегущего и локализованного плазмонов приводит к возникновению антикроссинга в спектре отражения структуры, что свидетельствует о формировании гибридных плазмонных мод. Важным является то, что происходит увеличение коэффициента пропускания по сравнению со случаем структуры без частиц. Для ТЕ-поляризации данного усиления пропускания не наблюдается, поскольку бегущий плазмон может

быть возбужден только ТМ-волной. На рисунке 3б представлены спектры пропускания ТМ-волны для двух значений угла падения, в которых имеются резонансные особенности. Положение и форма коротковолнового пика обуславливается спектральным и пространственным перекрытием локализованного и бегущего плазмонов. Ширина полосы пропускания зависит от размеров частиц. Полученные результаты перспективны для создания мультрезонансных оптических фильтров и биологических сенсоров.

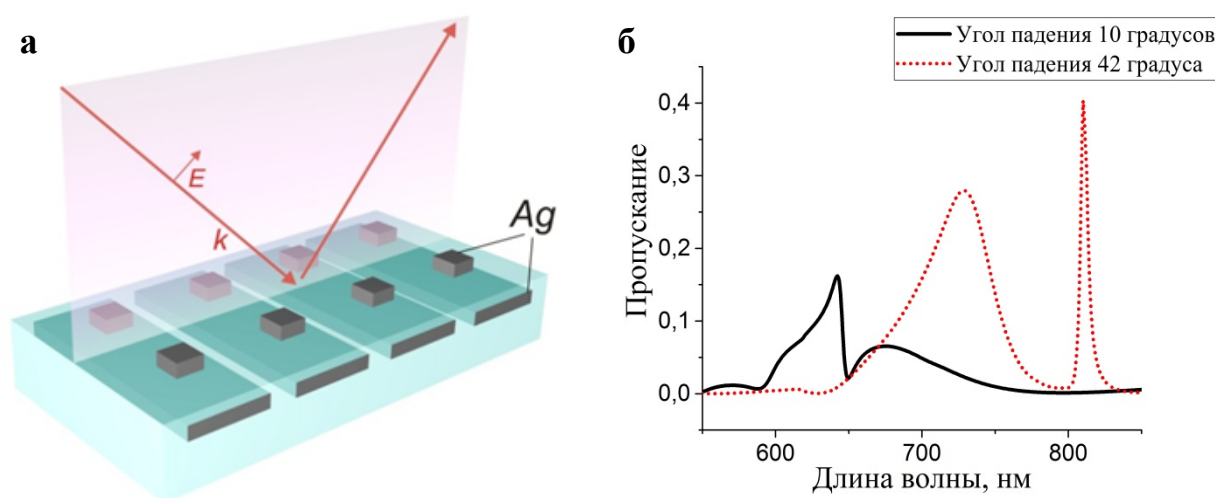


Рисунок 3. а) Геометрия структуры с перекрывающимися плазмонными резонансами на основе системы «нанорешетка – периодический массив металлических наночастиц» б) Численно рассчитанные спектры пропускания ТМ-поляризованного света для различных значений угла падения.

В диссертации методами численного моделирования показано, что способность эффективно управлять спектральными свойствами систем на основе метаповерхностей при помощи перекрывающихся резонансов перспективна для разработки динамически управляемых структур. Для этого система из массива металлических частиц, расположенных над металлической плёнкой, была модифицирована. В зазор между частицами и плёнкой добавлен слой диэлектрика, обладающий недиагональным тензором диэлектрической проницаемости. В качестве подобного материала может выступать, например, висмут-замещенный иттриевый феррит гранат (Bi:YIG). Влияние магнитного поля было учтено при помощи недиагонального тензора диэлектрической проницаемости. Рассмотрена геометрия экваториального магнитооптического эффекта Керра, то есть когда магнитное поле перпендикулярно плоскости падения света. Для неё были рассчитаны спектры отражения и абсолютного магнитооптического отклика, равного разности коэффициентов отражения при противоположных ориентациях магнитного. На рисунке 4а представлена трёхмерная карта (третья координата - цвет) коэффициента отражения ТМ-

поляризованной волны, на которой чёрный цвет соответствует высоким значениям отражения (0.4-0.6), жёлтый – близким к нулю. На карте 4а хорошо видны два типа особенностей: узкая наклонная линия, зависящая от угла падения, соответствует возбуждению бегущего плазмона и широкая вертикальная линия, соответствующая локализованному плазмонному резонансу. Стоит отметить, что свойства локализованного колебания отличаются от типичного поведения резонанса уединенной металлической частицы, поскольку в металлической подложке наводятся заряды изображения.

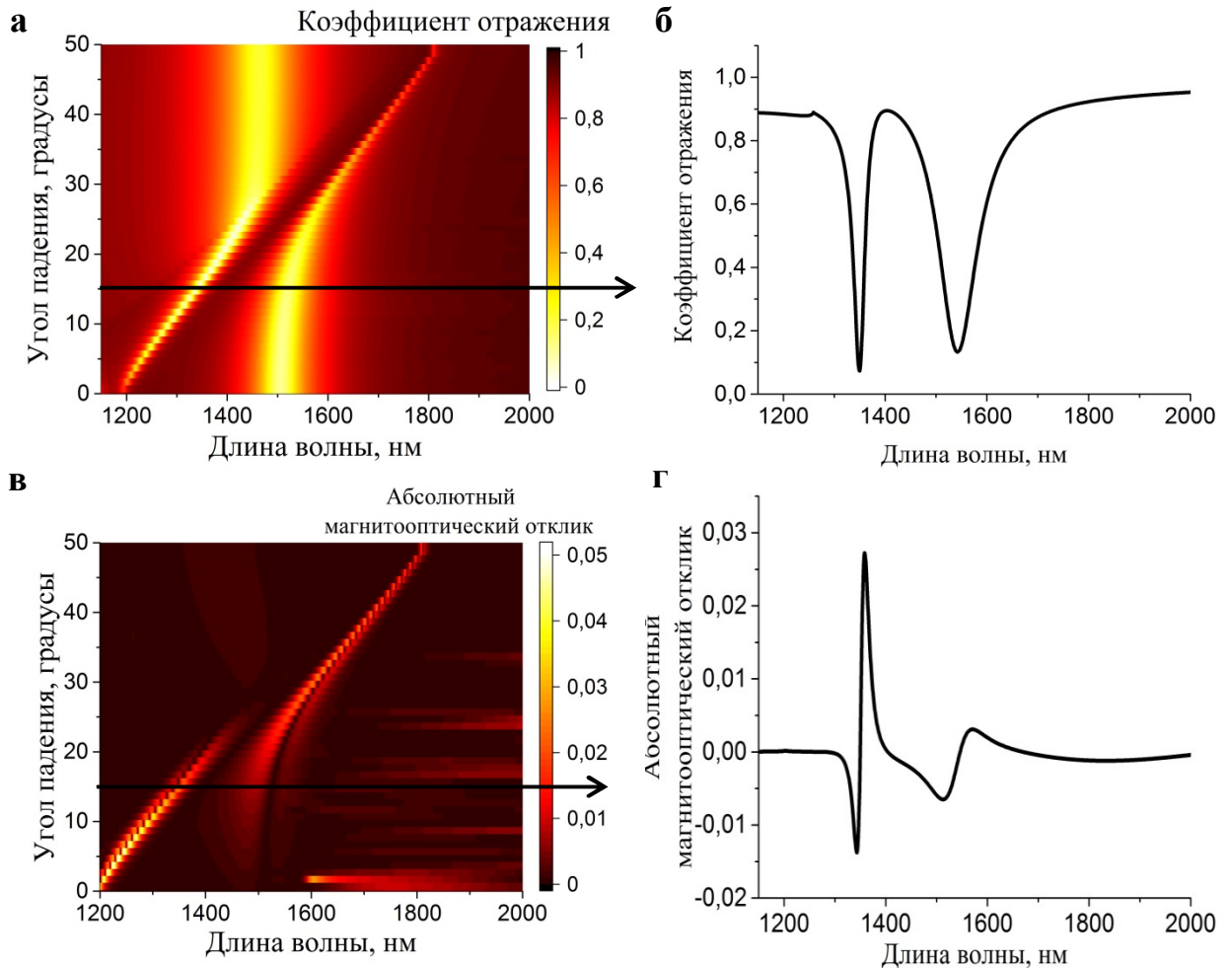


Рисунок 4. а) Карта коэффициента отражения ТМ волны для структуры с периодом $P=1000$ нм от угла падения и длины волны света. б) Спектр отражения структуры при угле падения 15 градусов. в) Зависимость модуля значения абсолютного магнитооптического отклика $\delta_{\text{абс}}$ от угла падения и длины волны света. г) Абсолютный магнитооптический отклик структуры при угле падения 15 градусов.

В области пересечения резонансов наблюдается антикроссинг (антипересечение), что свидетельствует о взаимодействии плазмонов. Для примера на рисунке 4б приведён график коэффициента отражения для угла падения 15 градусов, на котором провал в окрестности 1350 нм обусловлен

бегущим плазмоном, а резонанс на длине волны 1550 нм – локализованным плазмоном. Взаимодействие плазмонов привело к тому, что форма резонансных кривых изменилась, причём длинноволновый склон узкополосной особенности стал более резким. Для противоположных ориентаций магнитного поля были рассчитаны спектры отражения и вычислен абсолютный магнитооптический оклик, $\delta_{abc} = R(H) - R(-H)$, модуль которого приведён на рисунке 4в.

Спектральный отклик плазмонной структуры чувствителен к диэлектрическому окружению, поэтому изменение компонент тензора диэлектрической проницаемости магнитооптического материала приводит к сдвигу плазмонного резонанса. Его максимальное значение достигается на резком склоне резонанса, важно, что это происходит не при нулевом коэффициенте отражения. Например, при угле падения 15 градусов (Рисунок 4г), максимум наблюдается при коэффициенте отражения 0.35.

В четвёртой главе представлены результаты исследования поляризационных характеристик киральных метаповерхностей на основе массивов ленточных спиралей и полувитковых квази-спиралей.

В диссертационной работе была исследована киральная структура, представленная на рисунке 5а [11]. Структура представляет собой диэлектрическую подложку с синусоидальным профилем, на которой находятся профилированные гребни Т-образной формы с поверхностной металлизацией. Данная система являет собой метаповерхность, состоящую из двух массивов металл-диэлектрических ленточных спиралей. Совместно с соавторами было продемонстрировано, что предложенный подход к формированию позволяет создавать такие структуры на больших площадях методом литья и последующей металлизацией. Данная система представляет интерес, поскольку в ней могут возбуждаться различные резонансы, которые влияют на киральные характеристики. Спектры пропускания структуры содержат большое количество особенностей, поэтому для анализа явлений были рассчитаны электромагнитные характеристики уединенных металлических спиралей, массивов спиралей в вакууме и финальной структуры, лежащей на тонкой диэлектрической подложке (Рисунок 5б). На графиках коэффициента пропускания массивов металлических спиралей в вакууме, видно, что резонансы возбуждаются на длинах волн, кратных длине витка как для ТМ- (вектор электрического поля **E** падающей волны перпендикулярен оси спиралей), так и для ТЕ-поляризаций (**E** параллелен оси спиралей).

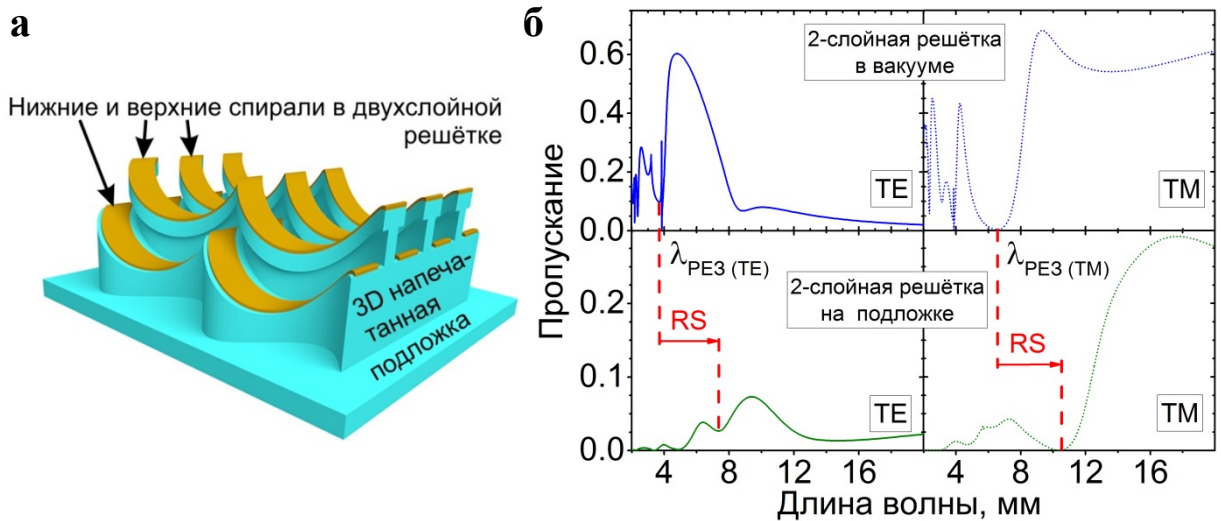


Рисунок 5. а) Эскиз метаповерхности на основе двухслойного массива ленточных спиралей [11]. Голубой цвет соответствует диэлектрику, жёлтый – металлу. б) Рассчитанные спектры пропускания ТЕ и ТМ волн двухслойной решетки тонкопленочных металлических спиралей в вакууме и на подложке для случая нормального падения. Показан сдвиг λ -резонанса в красную область спектра (RS на графиках)

В случае, когда массив металлических спиралей находится на диэлектрической подложке, резонанс сдвигается в красную область спектра (RS на графиках). Установлено, что в спектрах имеются особенности в виде резких провалов, которые обусловлены дифракционными эффектами. На длинах волн, равных периодам структуры и шагу спиралей, наблюдаются рэлеевские аномалии и волноводные резонансы в подложке. Стоит отметить, что в расчёте были учтены потери в диэлектрике, которые привели к существенному уменьшению амплитуд резонансов. В длинноволновой области коэффициент пропускания ТМ-волны значительно больше, чем ТЕ-волны, поскольку структура представляет собой решёточный поляризатор.

Вследствие взаимного электромагнитного влияния спиралей спектры пропускания усложняются. Расчеты показали, что основной резонанс сдвигается в коротковолновую область. При этом наблюдается практически полное затухание проходящей кополяризованной волны (99 %), а расчетное значение угла поворота плоскости поляризации достигает 90° . Углы поворота плоскости поляризации и эллиптичности рассчитывались из коэффициентов пропускания ко- и кроссполяризацій A_{xx} , A_{xy} и разности фаз γ между ними:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2A_{xx}A_{xy} \cos \gamma}{A_{xx}^2 - A_{xy}^2} \right)$$

На рисунке 6 представлены расчётные спектры поворота плоскости поляризации прошедшего излучения ТЕ-волны для случая отсутствия потерь в материале подложки. На карте хорошо видно, что при длине волн менее 7 мм, то есть в условиях дифракционного режима $\lambda < P \cdot \sqrt{\varepsilon_{sub}}$, где P - период структуры, ε_{sub} – диэлектрическая проницаемость подложки, в спектрах наблюдаются множественные особенности. Проведённые численные расчёты показали, что их спектральное положение зависит от периода структуры, толщины и диэлектрической проницаемости подложки. Характер обнаруженных спектральных особенностей позволяет сделать вывод о том, что они вызваны волноводными резонансами в подложке, при этом углы поворота достигают высоких значений, вплоть до 90 градусов (красный и синий цвета).

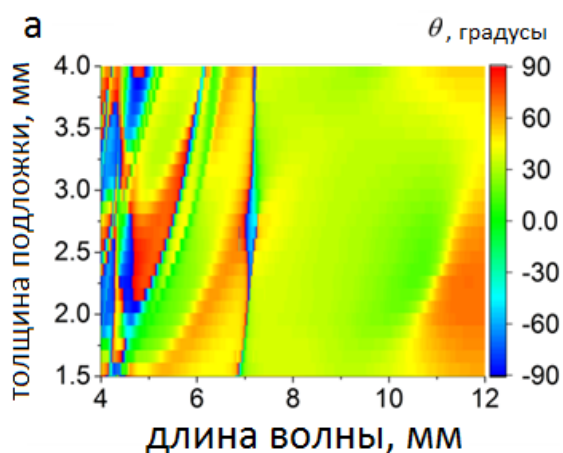


Рисунок 6. Рассчитанный азимут поляризации прошедшей волны при падении ТЕ-поляризованного излучения на структуру со стороны металлических спиралей в зависимости от длины волны и толщины подложки.

Установлено, что углы поворота плоскости поляризации зависят от толщины подложки и при больших длинах волн, что можно объяснить влиянием резонанса типа Фабри-Перо. Учёт потерь в структуре приводит к тому, что амплитуды данных резонансов существенно уменьшаются. Полученные результаты были подтверждены коллегами по лаборатории экспериментально: киральные метаповерхности были изготовлены с помощью проекционной стереолитографии с последующим теневым напылением золота. Вращение плоскости поляризации превысило 40 градусов на длине волн 35 ГГц.

В диссертации численными методами была исследована структура из металлических полувитковых квазиспиралей, эскиз которой показан на рисунке 7. Метаповерхность была изготовлена методом прямого штампования тонкоплёночных металлических полос на полимерной подложке (Рисунок 7а). Было установлено, что максимумы угла поворота плоскости поляризации для ТЕ-, и ТМ-волн в окрестности 3 ТГц

обусловлены возбуждением полуволнового резонанса в металлических элементах (Рисунок 7б). В спектре пропускания наблюдаются осцилляции во всём измеренном диапазоне, вызванные резонансом Фабри-Перо. В области 4-6 ТГц хорошо видны множественные провалы, которые обусловлены возбуждением волноводных резонансов. Их большое количество можно объяснить тем, что толщина подложки в несколько раз превышает длину волны излучения. Данные интерференционные эффекты связаны с многократными переотражениями в структуре, приводящими к модуляции кроссполяризованной компоненты, а также чередованию максимумов и минимумов в спектре угла поворота плоскости поляризации. Было установлено, что при спектральном и пространственном перекрытии полуволнового и волноводного резонансов, в спектрах коэффициента пропускания наблюдается антикроссинг, что свидетельствует о формировании гибридных мод. Отметим, что даже в исходной структуре, представляющей собой массив дипольных антенн, нарушена симметрия относительно зеркального отражения. Это приводит к возникновению дополнительных резонансов в спектрах пропускания, поскольку падающая электромагнитная ТМ-волна возбуждает не только ТМ-волноводную моду, но и ТЕ-моду. Экспериментальные измерения в лаборатории показали хорошее согласие с расчётными данными. Было установлено, что уменьшение расстояния между элементами позволяет сдвигать резонансную частоту в высокочастотную область спектра. Тем самым появляется возможность управлять свойствами метаматериала без изменения размеров самих элементов. Таким образом, возможность управлять резонансными свойствами и киральностью исследованных метаматериалов делает их перспективными для создания преобразователей поляризации.

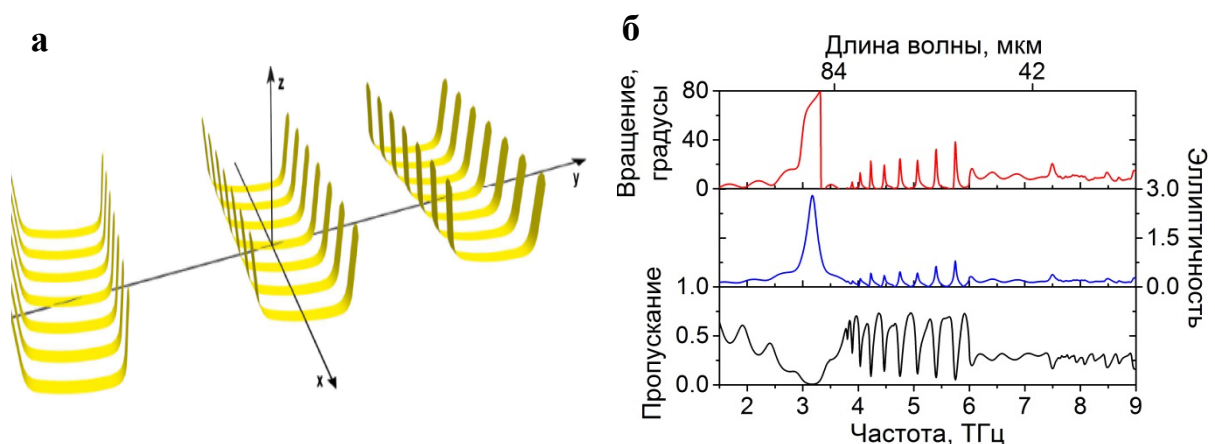


Рисунок 7. а) Эскиз структуры на основе полувитковых квази-спиралей, полученных впечатыванием тонкоплёночных металлических полосок в полимерную подложку. б) рассчитанные спектры азимута поляризации, эллиптичности и пропускания для падающего излучения, поляризованного перпендикулярно рядам полувитковых Au квази-спиралей.

Представленные выше метаповерхности являются пассивными элементами. Для того, чтобы динамически управлять поляризацией электромагнитной волны, был предложен метаматериал с перекрывающимися резонансами. Он представляет собой массив трехмерных резонаторов на основе двух ортогонально пересекающихся проводящих спиралей и тонкоплёночной решётки из материала с фазовым переходом типа «полупроводник-металл». Наиболее подходящим вариантом для этого является диоксид ванадия (VO_2), у которого изменение проводимости при фазовом переходе может достигать пяти порядков. На частоте 43,5 ГГц коэффициент преобразования поляризации прошедшей волны достигает пика 95%, и коэффициент пропускания ко-поляризации равен нулю и плоскость поляризации поворачивается на 90° относительно падающей волны. Такая высокая эффективность преобразования обусловлена высокодобротным возбуждением $\lambda/2$ -резонанса в проволочных спиралях и его спектральным и пространственным перекрытием с резонансом Фабри-Перо в резонаторной полости. Переключение диоксида ванадия из металлического состояния в полупроводниковое приводит к исчезновению резонанса Фабри-Перо, и коэффициент преобразования поляризации уменьшается до значений, соответствующих однослойному массиву спиральных резонаторов.

Заключение

Работа посвящена исследованию механизмов контроля поляризации электромагнитного излучения в мультирезонансных системах на основе метаповерхностей. Найдены условия усиления поляризационной селективности и оптической активности систем за счёт управления степенью спектрального перекрытия резонансов в субволновых системах на основе метаповерхностей. Результаты численных расчётов электромагнитных характеристик структур хорошо согласуются с экспериментальными данными. Предложен дизайн структур для динамического управления поляризацией. Полученные результаты открывают новые возможности для решения задач поляриметрии, сенсорики, а также для создания модуляторов электромагнитного излучения.

1. С помощью численных расчётов показано, что в СВЧ-метаповерхностях на основе двухслойных массивов металлических ленточных спиралей, лежащих на диэлектрической подложке, происходит возбуждение λ резонансов в спиралях, резонансов типа Фабри-Перо и волноводных резонансов в подложке. Спектральное перекрытие резонансов приводит к существенному увеличению угла поворота плоскости поляризации проходящего излучения. Поворот плоскости поляризации СВЧ-излучения может достигать 90 градусов в окрестности λ -резонанса в спиралях.

2. Показано, что терагерцовая метаповерхность на основе однослойного массива тонкоплёночных полувитковых 3D-квазиспиралей, расположенных на толстой диэлектрической подложке, поворачивает плоскость поляризации проходящего излучения более чем на 50° за счёт перекрытия полуволновых и множественных волноводных резонансов в подложке. В структурах с нарушенной симметрией зеркального отражения возникают дополнительные резонансные особенности в спектрах пропускания кросс-поляризованной компоненты электромагнитной волны.
3. Для субволновых высокоаспектных металл-диэлектрических нанорешеток с периодом 180 нм экспериментально и с помощью численного моделирования установлены зависимости коэффициентов отражения и пропускания от глубины рельефа решётки и угла падения электромагнитной волны. Это позволило идентифицировать плазмонные резонансы, интерференционные эффекты, аномалии Рэлея и определить их влияние на оптические свойства структур. Показано, что для оптических систем на основе двухуровневых гибридных решёточных метаповерхностей с шириной полос 100 нм наблюдается изменение (более чем в 2 раза) коэффициентов отражения и поглощения в спектральной области локализованного плазмонного резонанса (500-600 нм), вызванное резонансом типа Фабри-Перо, зависящим от глубины рельефа.
4. Экспериментально установлено, что у металл-диэлектрических нанорешеточных ИК- поляризаторов с периодом 180 нм с двухуровневой металлизацией коэффициент экстинкции на длине волны 1550 нм достигает 34 дБ, а с четырёхуровневой 45 дБ. В обоих случаях коэффициент пропускания превышает 0.6 при $\lambda > 1$ мкм. Показано, что многослойные поляризационные системы на основе прозрачного полимера и золота, блокируют пропускание видимого света любой поляризации вследствие возбуждения локализованного плазмонного резонанса и собственного поглощения в золотых полосках. Сформированные и исследованные структуры являются гибкими и перспективны в качестве элементов широкоформатных систем формирования изображений.
5. Предложен оригинальный дизайн двухуровневой метаповерхности, составленной из серебряной решётки и периодического массива серебряных наночастиц. Численными методами показано, что в данной системе возникают две гибридные моды, обусловленные спектральным и пространственным перекрытием бегущего и локализованных плазмонов. Эффект приводит к увеличению коэффициента пропускания по сравнению со структурой без наночастиц и перспективен для создания мультрезонансных систем.
6. Предложена и исследована динамически управляемая система «металлическая плёнка - массив плазмонных наночастиц, разделённые субволновым слоем магнитооптического диэлектрика». Показано, что изменение направления магнитного поля в геометрии экваториального эффекта Керра приводит к сдвигу резонанса типа Фано, вызванного

перекрытием бегущего и локализованного плазмонов. Установлено, что для системы с оптимизированными геометрическими параметрами при угле падения 15 градусов величина абсолютного магнитооптического отклика достигает $2.5 \cdot 10^{-2}$ на крутом склоне резонанса типа Фано при высоком коэффициенте отражения, достигающим 0.35.

7. Методами численного моделирования показано, что перестраиваемая метаповерхность на основе высококонтрастной субволновой кремниевой решетки с покрытием из диоксида ванадия позволяет изменять угол поляризации проходящего субтерагерцового излучения до 45 градусов при фазовом переходе «полупроводник-металл».

8. Предложена динамически управляемая поляризационная система, состоящая из метаповерхности на основе массива металлических двойных спиралей и плоской решётки из диоксида ванадия. Методами численного моделирования показано, что эффективность преобразования поляризации падающей волны в ортогональную при переключении фазы VO₂ из полупроводниковой в металлическую превышает 95 %. Установлено, что эффект наблюдается при условии перекрытия полуволнового резонанса спиралей и резонанса типа Фабри-Перо в полости между спиральями и VO₂-решёткой.

Результаты работы изложены в следующих статьях:

[A1] Gayduk, A. E., Prinz, V. Y., Seleznev, V. A., & Rechkunov, S. N. (2016). Large-area multilayer infrared nano-wire grid polarizers // *Infrared Physics & Technology*. – 2016. – Т. 75. – С. 77-81.

[A2] Chesnitskiy A. V., Gayduk A. E., Prinz V. Y. Transverse magneto-optical Kerr effect in strongly coupled plasmon gratings // *Plasmonics*. – 2018. – Т. 13. – №. 3. – С. 885-889.

[A3] Golod, S. V., Seyfi, V. A., Buldygin, A. F., Gayduk, A. E., & Prinz, V. Y. (2018). Large-Area 3D-Printed Chiral Metasurface Composed of Metal Helices. *Advanced Optical Materials*, 6(19), 1800424.

[A4] Golod, S. V., Gayduk, A. E., Kurus, N. N., Kubarev, V. V., & Prinz, V. Y. 3D micro/nanoshaping of metal strip arrays by direct imprinting for chiral metasurfaces // *Nanotechnology*. – 2020. – Т. 31. – №. 43. – С. 435302.

[A5] Gayduk A. E., Rechkunov, S. N., Seleznev, V. A., Prinz, V. Y. Optical filters based on subwavelength metal-dielectric gratings. In *Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2016 17th International Conference of Young Specialists on* (pp. 8-10). IEEE.

[A6] Gayduk A. E., Prinz V. Y. Vanadium Dioxide–Based Metasurface for Polarization Dynamic Control in Subterahertz Range // *2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. – IEEE, 2019. – С. 7-10.

[A7] Seyfi V. A., Gayduk A. E., Prinz V. Y. Tunable Chiral Metamaterial for Polarization Control in Microwave Region // *2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. –

Список цитируемой литературы:

1. Cai W., Shalaev V. M. Optical metamaterials. – Berlin, Germany: : Springer, 2010. – Т. 10. – №. 6011.
2. Krasnok A. et al. Towards all-dielectric metamaterials and nanophotonics //Metamaterials X. – International Society for Optics and Photonics, 2015. – Т. 9502. – С. 950203.
3. Rubin N. A. et al. Polarization state generation and measurement with a single metasurface //Optics express. – 2018. – Т. 26. – №. 17. – С. 21455-21478.
4. Климов В. Наноплазмоника //Российские нанотехнологии. – 2009. – Т. 4. – №. 9-10. – С. 14-15.
5. Chai Z. et al. Ultrafast All-Optical Switching //Advanced Optical Materials. – 2017. – Т. 5. – №. 7.
6. Ameling R., Giessen H. Microcavity plasmonics: strong coupling of photonic cavities and plasmons //Laser & photonics reviews. – 2013. – Т. 7. – №. 2. – С. 141-169.
7. Tali S. A. S., Zhou W. Multiresonant plasmonics with spatial mode overlap: overview and outlook //Nanophotonics. – 2019. – Т. 8. – №. 7. – С. 1199-1225.
8. Luk'yanchuk B. et al. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials //Nature materials. – 2010. – Т. 9. – №. 9. – С. 707.
9. Christ A. et al. Controlling the interaction between localized and delocalized surface plasmon modes: Experiment and numerical calculations //Physical Review B. – 2006. – Т. 74. – №. 15. – С. 155435.
10. Limonov M. F. et al. Fano resonances in photonics //Nature Photonics. – 2017. – Т. 11. – №. 9. – С. 543.
11. Golod S. V. et al. Large-Area 3D-Printed Chiral Metasurface Composed of Metal Helices //Advanced Optical Materials. – 2018. – Т. 6. – №. 19. – С. 1800424.