

На правах рукописи



Наумова Елена Валериевна

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
КИРАЛЬНЫХ ТЕНАГЕРЦОВЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ НАНОПЛЕНОЧНЫХ МИКРОСПИРАЛЕЙ**

Специальность 01.04.07 -  
Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск-2017

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, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией физики и технологии трёхмерных наноструктур

**Официальные оппоненты:**

Драчев Владимир Прокопьевич, кандидат физико-математических наук, Центр фотоники и квантовых материалов, Сколковский институт науки и технологий, профессор

Плеханов Александр Иванович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и электротехники Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией физики лазеров

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», Международный научно-исследовательский центр нанофотоники и метаматериалов

Защита состоится **« 30 » мая 2017 года в 15.00 часов** на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: 630090, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте института:

[http://www.isp.nsc.ru/comment.php?id\\_dissert=918](http://www.isp.nsc.ru/comment.php?id_dissert=918)

Автореферат разослан «3» апреля 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, доцент



Артур Григорьевич Погосов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время активно развивается техника терагерцового (ТГц) диапазона (0.1-10 ТГц) [1]. Благодаря достаточной прозрачности в этом диапазоне атмосферы, биологических тканей и многих распространенных материалов, высокой информативности ТГц-спектров сложных биохимических комплексов, а также ряда других особенностей ТГц излучение востребовано практически во всех современных системах гражданского и военного применения (телекоммуникации, медицинская диагностика, системы безопасности, радиолокация, фармацевтика, астрофизика, исследования плазмы и др.). В этом диапазоне методы управления поляризацией, используемые в радиотехнике, уже не применимы. В то же время многие традиционные оптические элементы для управления поляризацией не могут быть реализованы из-за отсутствия материалов с соответствующими свойствами. В частности, в оптическом и ИК диапазоне для управления поляризацией широко используются электромагнитные киральные свойства жидкокристаллических структур, а в ТГц диапазоне эти свойства становятся незначительными.

Электромагнитная киральность, т.е. селективность свойств по отношению к волнам левой и правой круговой/эллиптической поляризации, приводит к таким явлениям как оптическая активность (вращение плоскости поляризации проходящего излучения за счет разности фазовых скоростей волн левой и правой поляризации) и круговой дихроизм (изменение эллиптичности излучения за счет разности соответствующих коэффициентов поглощения). Для использования этих явлений в целях управления поляризацией ТГц излучения необходимы материалы с практически значимыми киральными свойствами в этом диапазоне. Естественных и синтетических материалов с такими свойствами не существует.

Электромагнитные метаматериалы – это искусственные структуры, интегральные материальные параметры которых являются результатом электромагнитного отклика большого количества специально сконструированных резонансных микроэлементов [2]. Монослойные метаматериалы иногда называют метаповерхностями [3]. В последние два десятилетия были получены метаматериалы с целым рядом новых электромагнитных свойств, что связано, в первую очередь, с достижениями в микро- и нанотехнологии. Были продемонстрированы магнетизм на оптических частотах [4], отрицательный показатель преломления [5, 6] и др. Вместе с тем киральные электромагнитные свойства в терагерцовом диапазоне оставались недостижимыми по технологическим причинам. Поскольку характерные размеры резонаторов для этого диапазона составляют порядка десятков микрометров, терагерцовые метаматериалы, как правило, изготавливают по планарным

технологиям. Для получения функциональных киральных электромагнитных свойств требуются не плоские, а трехмерные элементы. В радиодиапазоне киральные метаматериалы изготавливали на основе спиральных резонаторов с длиной, близкой к половине длины волны [7]. Современные технологии не позволяют выполнить подобные массивы резонансных спиралей для ТГц диапазона.

Киральные ТГц-метаматериалы востребованы в качестве элементов устройств управления терагерцовым излучением как аналогичных оптическим (например, сверхтонкие волновые пластинки, вращатели поляризации), так и принципиально новых, например, экранов невидимости, терагерцовых линз с разрешением выше дифракционного предела и т.п. Это делает создание терагерцовых киральных метаматериалов высокоактуальной проблемой.

**Целью диссертационной работы** является создание киральных терагерцовых метаматериалов и систем на основе металл-полупроводниковых микроспиралей и экспериментальное исследование их электромагнитных свойств.

Для достижения цели решались следующие основные **задачи**:

- Разработка киральных терагерцовых метаматериалов на основе микроспиралей из металл-полупроводниковых нанопленок;
- Разработка способов формирования плотных массивов микроспиралей методом сворачивания напряженных металл-полупроводниковых пленок.
- Анализ и интерпретация резонансных электромагнитных свойств созданных метаматериалов и систем в терагерцовом диапазоне (спектров пропускания, вращения плоскости поляризации и эллиптичности), построение физических моделей, постановка дополнительных экспериментов для проверки моделей.

### **Научная новизна работы**

Показано, что метод сворачивания трехмерных оболочек из напряженных нанопленок может быть применен для формирования метаматериалов. Созданные в рамках диссертационной работы метаматериалы построены на принципиально новом типе резонансных элементов – прецизионных трехмерных микрооболочках из нанопленок. Такие элементы не могут быть получены с помощью других современных технологий. Разработаны и сформированы биизотропный и бианизотропный киральные 2D метаматериалы (металповерхности), а также системы на их основе. Экспериментально показано, что полученные структуры резко изменяют поляризацию проходящего излучения в

терагерцовом диапазоне. В частности, установлено, что система в виде бианизотропной метаповерхности толщиной  $<\lambda/6$  на подложке GaAs вращает плоскость поляризации проходящего излучения на угол  $\alpha > 85^\circ$ , причем при сдвиге частоты на  $\Delta f = 0.4\%$  изменение угла поворота составляет  $\Delta\alpha > 150^\circ$ , т.е. вращение носит резко резонансный характер.

В спектрах вращения плоскости поляризации и эллиптичности проходящего излучения системы в виде квадратной решетки микроspirалей на подложке GaAs обнаружены резкие регулярные пики, которые отличаются по периоду от пиков в спектре пропускания. Возникновение пиков объяснено возникновением своеобразного кирального волноводного резонанса. За счет того, что период решетки меньше длины волны излучения в воздухе, но больше длины волны в подложке, на метаповерхности происходит дифракция проходящего излучения. Наклонные волны первого порядка дифракции испытывают полное внутреннее отражение на тыльной стороне подложки и при отражении от метаповерхности повторно дифрагируют, в том числе в направлении нормали к метаповерхности. В результате возникает интерференция волн с разной амплитудой, фазой и поляризацией. Данный механизм подтвержден экспериментально, эффект ранее не наблюдался из-за отсутствия подобных структур.

Таким образом, **научная новизна** заключается в том, что впервые в мире:

- получены метаматериалы с новым типом трехмерных резонансных элементов (прецизионными нанопленочными оболочками);
- сформированы метаматериалы, обладающие резонансными киральными свойствами в ТГц диапазоне;
- получена искусственная оптическая активность в ТГц диапазоне,
- обнаружен и объяснен необычный волноводный резонанс в системе квадратная решетка металл-полупроводниковых микроspirалей – слой GaAs.

### **Научная и практическая ценность работы**

Впервые получены метаматериалы, обладающие резонансными киральными свойствами в ТГц диапазоне. Естественные и синтетические материалы, включая жидкие кристаллы (ЖК), не обладают в этом диапазоне практически значимыми киральными свойствами. Продемонстрированная относительная оптическая активность (угол поворота проходящего излучения, приходящийся на толщину кирального слоя, выраженную в длинах волн) выше, чем у лучших образцов ЖК в их рабочем диапазоне на 1-2 порядка. Полученные структуры с резонансными метаповерхностями толщиной  $\lambda/6$ -  $\lambda/10$  вращают плоскость поляризации проходящего излучения на десятки градусов.

Гигантская оптическая активность, продемонстрированная в терагерцовом диапазоне, может быть использована для создания сверхтонких элементов управления поляризацией, амплитудой, направлением и фазой ТГц излучения. Обнаруженные резкие резонансные пики в спектрах вращения плоскости поляризации и эллиптичности в системах киральная метаповерхность–подложка с высоким показателем преломления могут быть использованы для разработки высокорезонансных преобразователей поляризации.

Получен научный и практический задел для создания киральных и некиральных метаматериалов с отрицательным показателем преломления, неотражающих метаматериалов с высоким поглощением, магнитных метаматериалов, а также метаматериалов и систем, предназначенных для динамического управления поляризацией, фазой, интенсивностью и направлением излучения.

Предложенный способ закрепления свернутых трехмерных оболочек на поверхности подложки с помощью дополнительных элементов из резиста позволяет формировать регулярные массивы с высокой плотностью трехмерных элементов, что может использоваться в технологии микро и наноструктурирования для формирования не только метаматериалов, но и других массивов трехмерных оболочек, свернутых из напряженных пленок. При запечатывании оболочек в полимерную пленку предложенный способ обеспечивает отсутствие разрывов оболочек.

Показано, что метод сворачивания трехмерных оболочек из напряженных нанопленок может быть применен для формирования метаматериалов, причем высокую практическую ценность обеспечивают следующие его преимущества:

- прецизионность и гладкие конфигурации 3D–резонаторов, точное позиционирование и ориентация в массиве, воспроизводимость и однородность массивов, что способствует получению точно заданных высокорезонансных свойств метаматериалов;
- трехмерные конфигурации элементарных резонаторов, широкое разнообразие возможных конфигураций и материалов, что позволяет формировать метаматериалы с новыми электромагнитными свойствами, в частности киральными, которые не могут быть изготовлены с помощью других современных технологий;
- возможность масштабирования размеров резонаторов от сотен микрон до единиц нанометров, что соответствует резонансным частотам метаматериалов от СВЧ до видимого диапазона;
- совместимость с технологией производства интегральных схем, параллельность всех технологических операций и возможность их автоматизации делают метод высокоперспективным для промышленного производства метаматериалов.

Разработанные конфигурации метаматериалов ТГц диапазона могут быть масштабированы для получения киральных метаматериалов ИК и оптического диапазонов. На структуры с киральными свойствами и способ их формирования получен патент.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 18 российских и международных научных конференциях:

14, 15, 19 и 24 международных симпозиумах “Nanostructures: Physics and Technology” (Санкт-Петербург, 2006, Новосибирск, 2007, Екатеринбург, 2011, Санкт-Петербург, 2016); Joint 31<sup>st</sup> International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14<sup>th</sup> International Conference on Terahertz Electronics (Shanghai, China, 2006) , 34<sup>th</sup>, 36<sup>th</sup> International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (Busan, Korea, 2009, Houston, Texas, USA, 2011); Workshop “New scientific possibilities with high power THz sources”(Daresbury Laboratory, UK, 2006); 1<sup>st</sup>, 5<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> Int. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics "Metamaterials" (Rome, Italy, 2007, Barcelona, Spain, 2011, St. Petersburg, Russia, 2012); Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Нижний Новгород, институт прикл. физики, 2007), VIII Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Нижний Новгород, институт прикл. физики, 2011); International Symposium “Progress in Electromagnetic Researches” (Hangzhou, China, 2008); 2nd European Topical Meeting on Nanophotonics and Metamaterials “NANOMETА-2009 (Seefeld, Austria, 2009); 9 и 11 Российских конференциях по физике полупроводников (Новосибирск-Томск, 2009, Санкт-Петербург, 2013); 9<sup>th</sup> International symposium on measurement technology and intelligent instruments (St. Petersburg, 2009).

Среди докладов – 9 приглашенных, в том числе доклад по прорывным научным достижениям (“Breakthrough talk”) на авторитетной международной конференции по метаматериалам NANOMETА (Австрия, 2009 г).

Киральные структуры и способ их изготовления были запатентованы.

Созданные структуры, обладающие оптической активностью в ТГц диапазоне, были переданы в ИЯФ СО РАН в качестве эталонов для разработки методик ранней онкодиагностики с использованием терагерцовой поляриметрии.

### **Публикации**

Основные результаты исследований по теме диссертации изложены в 1 патенте, 7 рецензируемых статьях и 20 тезисах и расширенных тезисах ведущих отечественных и международных конференций.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Формирование киральных терагерцовых метаматериалов в виде массивов трехмерных электромагнитных микрорезонаторов, точно позиционированных и ориентированных друг относительно друга, осуществимо методом сворачивания напряженных пленок.

Разработанные на основе данного метода технологические маршруты обеспечивают воспроизводимое формирование киральных терагерцовых метаматериалов в виде

а) квадратной решетки одновитковых нанопленочных микроспиралей (InGaAs/GaAs/Ti/Au);

б) массива параллельных нанопленочных трубок (InGaAs/GaAs), на внутренней стороне которых расположены одновитковые микроспиралы (Ti/Au).

2. Искусственная оптическая активность сформированного биизотропного метаматериала (квадратная решетка микроспиралей в полимерной пленке) в терагерцовом диапазоне достигает  $170^\circ/\lambda$ , т.е. на 3-5 порядков выше, чем у естественных оптически-активных веществ, и на 1-2 порядка выше, чем у жидкокристаллических структур.

3. Характерной особенностью систем на основе сформированных метаматериалов и плоскопараллельных слоев GaAs являются резкие регулярные пики в спектрах вращения плоскости поляризации и эллиптичности проходящего излучения. В системах с параллельными микроспиралами пики обусловлены в основном Фабри-Перо эффектом. В системах с квадратной решеткой микроспиралей пики возникают за счет своеобразного волноводного резонанса, связанного с дифракцией на киральной решетке.

**Личный вклад** соискателя в диссертационную работу заключается в разработке метаматериалов и технологических маршрутов их формирования на основе метода сворачивания напряженных гетеропленок, постановке экспериментов по формированию массивов трехмерных оболочек, планировании схем экспериментальных исследований киральных свойств полученных метаматериалов и систем в ТГц диапазоне, анализе их спектров вращения плоскости поляризации, эллиптичности и пропускания в ТГц диапазоне, объяснении механизмов возникновения пиков в спектрах поляризационных характеристик различных систем на основе метаматериалов, написании статей и патента совместно с соавторами, представлении результатов работы на международных конференциях.

## Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы из 143 наименований. Общий объем диссертации 90 страниц, включая 19 рисунков.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, указаны её новизна и практическая ценность, изложены основные положения, выносимые на защиту, представлена аннотация диссертационной работы.

**Первая глава** имеет обзорный характер. В первой её части дан краткий обзор современного состояния развития метаматериалов как научного направления. Во второй части введены понятия геометрической и электромагнитной киральности, кратко изложена история исследования киральных сред. Третья часть посвящена современным технологиям формирования киральных метаматериалов. В четвертой части представлены перспективы применения метаматериалов, обладающих киральными свойствами в терагерцовом диапазоне.

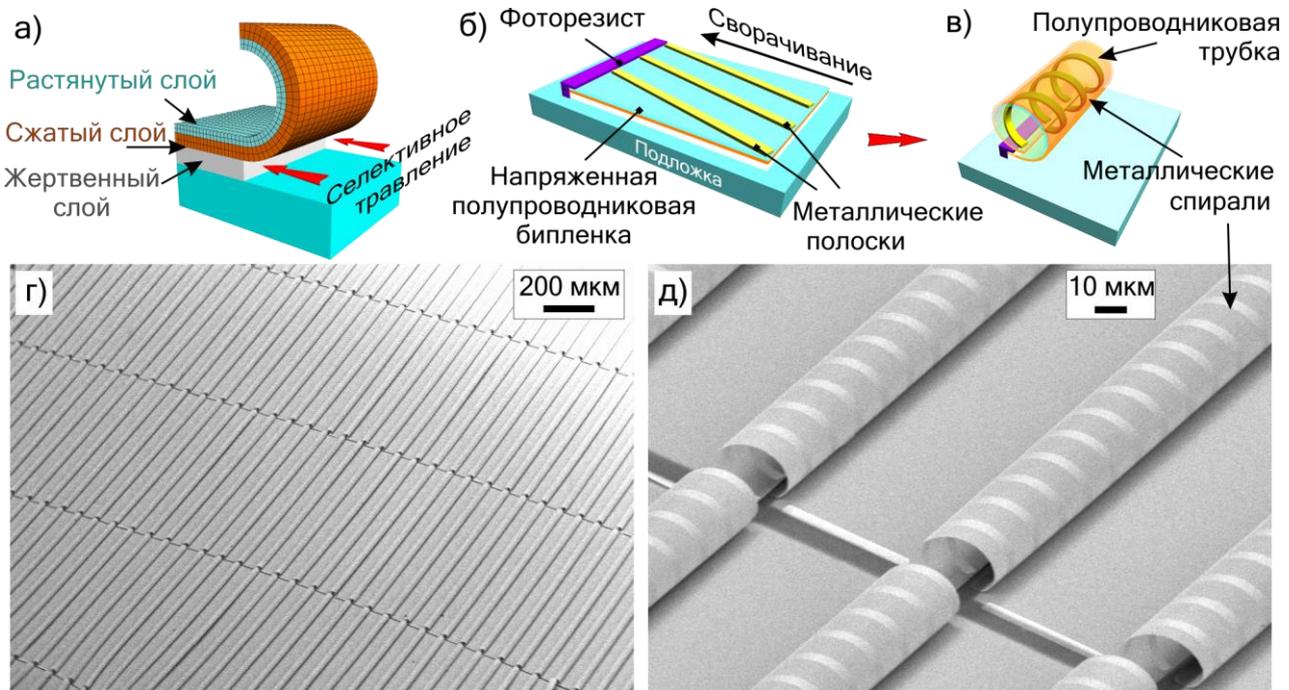
**Вторая глава** посвящена формированию метаматериалов терагерцового диапазона методом сворачивания. В первой части главы кратко изложены основы метода сворачивания трехмерных оболочек из напряженных гетеропленок [8] и метода направленного сворачивания, основанного на анизотропии упругих свойств гетеропленок [8, 9]. Принцип сворачивания напряженных пленок поясняет схема на рис. 1а. При псевдоморфном росте все эпитаксиальные слои наследуют постоянную решетки подложки, при этом слой вещества, у которого в свободном состоянии постоянная решетки меньше, чем у подложки, растёт сжатым вдоль поверхности, а слой с большей постоянной решетки – растянутым. Для твердого раствора  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  постоянная решетки линейно зависит от  $x$ . Молекулярно-лучевая эпитаксия позволяет точно контролировать состав такого раствора и задавать толщину пленки вплоть до моноатомных слоев, что обеспечивает получение прецизионных оболочек с радиусом кривизны от единиц нанометров до сотен микрометров.

Остальные части главы являются оригинальными. Вторая часть посвящена закреплению трехмерных оболочек на подложке, что необходимо для формирования плотных массивов оболочек. Экспериментально было установлено, что среди предложенных методов крепления оболочек к подложке (вытравливание напряженных слоев, локальное окисление жертвенного слоя в месте закрепления и др.) оптимальным для воспроизводимого формирования однородных массивов является использование дополнительных литографических элементов из фоторезиста [A1-A7] (рис.1 б,в, 2 а).

Третья часть главы посвящена выбору конфигураций киральных метаматериалов. Был выполнен большой комплекс экспериментальных поисковых работ в целях выбора конфигураций, сочетающих воспроизводимость формирования с эффективными резонансными киральными электромагнитными свойствами. Разработанные конфигурации метаматериалов отличались геометрией и материалами элементов-оболочек, материалами подложек, позиционированием и ориентацией элементов-оболочек массива друг относительно друга. Некоторые СЭМ-изображения и схемы формирования представлены на рис.1 б-д, 2, 3. Для каждой из конфигураций были спроектированы литографические маски для формирования многослойных структур, профили эпитаксиальных пленок, разработаны соответствующие технологические маршруты и проведены серии экспериментов по формированию образцов метаматериалов. Эксперименты были проведены с более чем 1500 образцами. В результате были выбраны две конфигурации: бианизотропный метаматериал в виде двумерного массива полупроводниковых микротрубок с металлическими спиралями (рис. 1 в-д) и биизотропный киральный метаматериал в виде квадратной решетки металл-полупроводниковых спиралей (рис. 2б). Эти конфигурации были наилучшими по сочетанию технологичности и воспроизводимости процессов формирования, а также однородности получаемых массивов по площади. Геометрические пропорции одновитковых спиральных резонаторов для этих двух метаматериалов были выбраны согласно теоретическим расчетам в работах [10] и [11] соответственно.

В четвертой части описано формирование структуры с осью симметрии 2 порядка в виде массива параллельных полупроводниковых трубок GaAs/In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.75</sub>As/GaAs (5/85/20 нм) с металлическими микроспиралями Ti/Au (3.5/65 нм) (см рис.1б-д) [A1, A8]. Был разработан технологический маршрут, основными операциями которого являются эпитаксиальный рост многослойных полупроводниковых пленок с заданным профилем, трехуровневая фотолитография по спроектированным фотошаблонам, осаждение металлов в вакууме, плазмохимическое и жидкостное травление, сушка в сверхкритической атмосфере CO<sub>2</sub>. На рис. 1б,в приведена схема сворачивания трубки со спиралями из плоской структуры с напряженными слоями. Для получения однородного высокоупорядоченного массива были введены специальные элементы-полоски из фоторезиста, которые обеспечивали сворачивание всех трубок в одном направлении и удерживали трубки на подложке после травления жертвенного слоя. Воспроизводимость процесса формирования подтверждена высокооднородными образцами метаматериалов с площадью до 6 см<sup>2</sup>. Были сформированы как структуры с правовинтовыми металлическими спиралями (рис 1 г, д), так и с левовинтовыми спиралями. Спирали имеют так называемую оптимальную геометрию, при которой электрическая, магнитная и киральная поляризуемости спирали вдоль оси равны

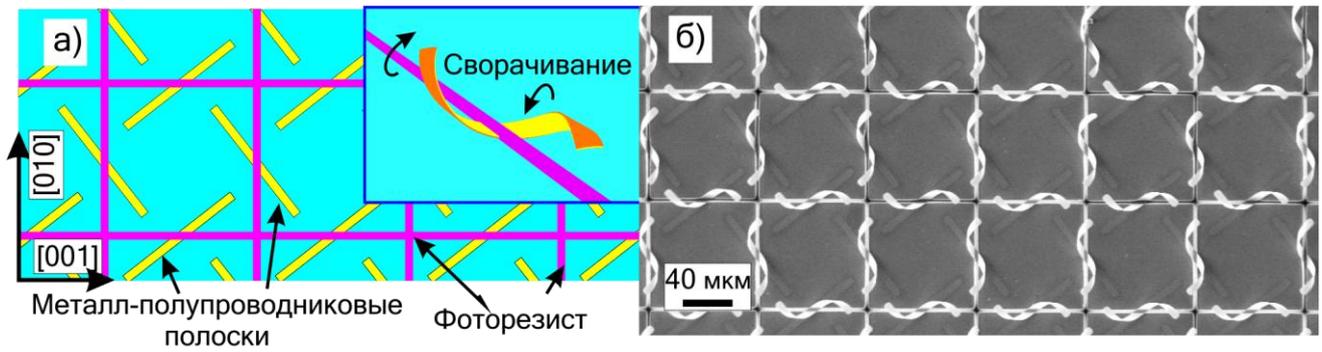
вблизи резонанса [10]. Металлические микроспирали обеспечивают резонансный киральный электромагнитный отклик метаматериала, а полупроводниковая трубка служит каркасом и относительно слабо взаимодействует с электромагнитным излучением. За счёт параллельной ориентации спиралей полученный метаматериал обладает высокой бианизотропией.



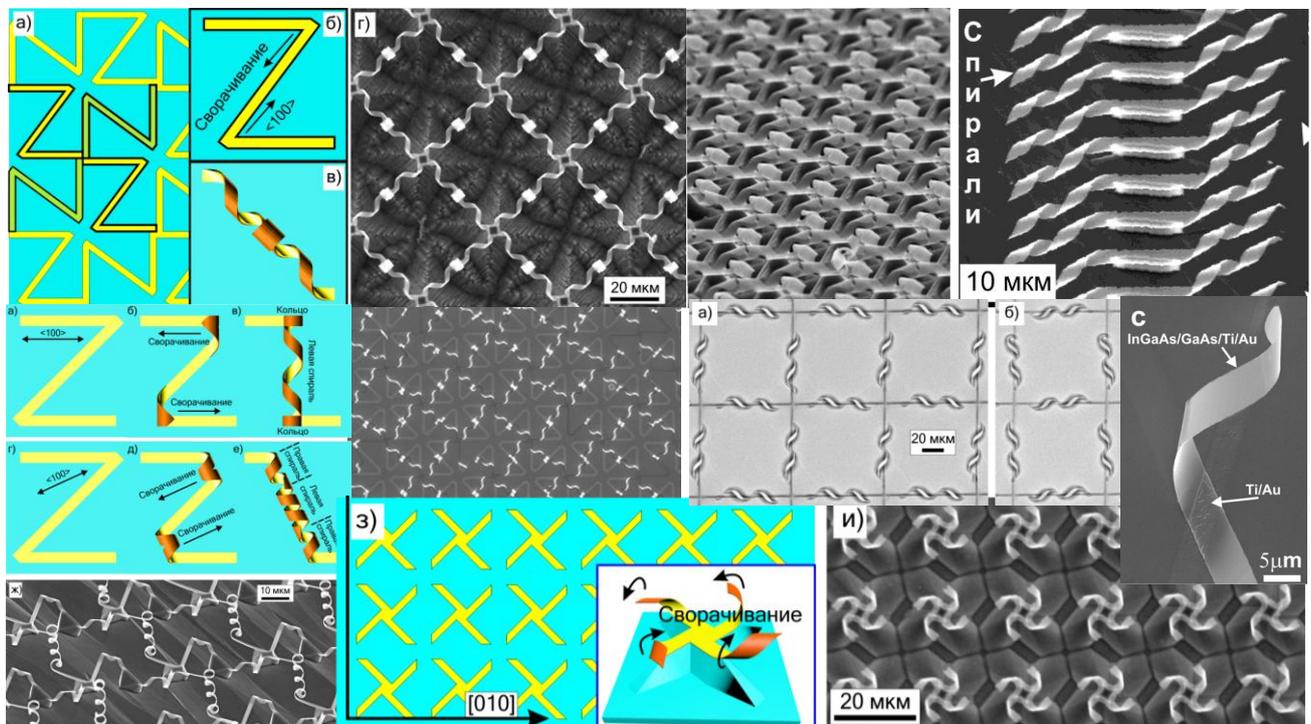
**Рис. 1** Формирование полупроводниковых трубок с металлическими микроспиральями.

**а**, Схема сворачивания напряженной бипленки в трубку, **б**, **в** - схема сворачивания трубки со спиральными резонаторами: плоская структура (**б**), свернутая структура (**в**). **г**, **д**, -СЭМ-изображения метаматериала в виде параллельных трубок ( $\text{GaAs}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ , 5/85/20 нм) с правовинтовыми спиральными резонансными элементами ( $\text{Ti}/\text{Au}$ , 3.5/65 нм) на подложке GaAs.

Пятая часть посвящена формированию метаматериала в виде квадратной решетки микроспиралей  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ti}/\text{Au}$  (16/41/3.5/65 нм) на подложке (100) GaAs (рис. 2) [A1, A2, A6, A7]. Разработанный технологический маршрут включает в себя операции эпитаксии, фотолитографии, жидкостного травления, сушки в сверхкритической атмосфере  $\text{CO}_2$ . Для получения максимального вращения плоскости поляризации проходящего излучения геометрия микроспиралей была выбрана в соответствии с пропорциями, предложенными в работе [11]. Благодаря оси симметрии 4 порядка данный метаматериал обладает биизотропными свойствами в плоскости решетки.



**Рис. 2** Формирование квадратной решетки металл-полупроводниковых микроспиралей. **а**, схема плоской структуры, на вставке- схема сворачивания; **б**, СЭМ-изображение метаматериала на основе спиралей  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ti}/\text{Au}$  (16/41/3.5/65 нм). Кристаллографические направления  $[001]$  и  $[010]$  соответствуют энергетически-оптимальному сворачиванию.

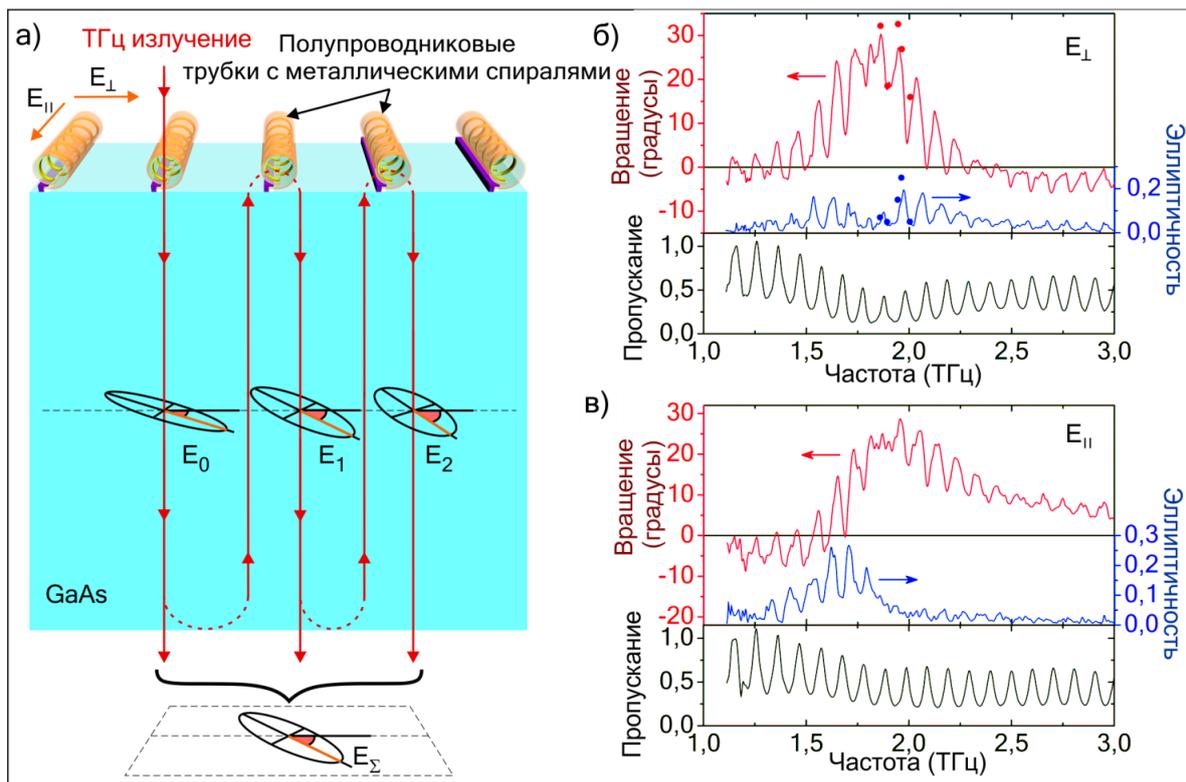


**Рис. 3** Примеры конфигураций и схем формирования киральных массивов оболочек, свернутых из напряженных пленок.

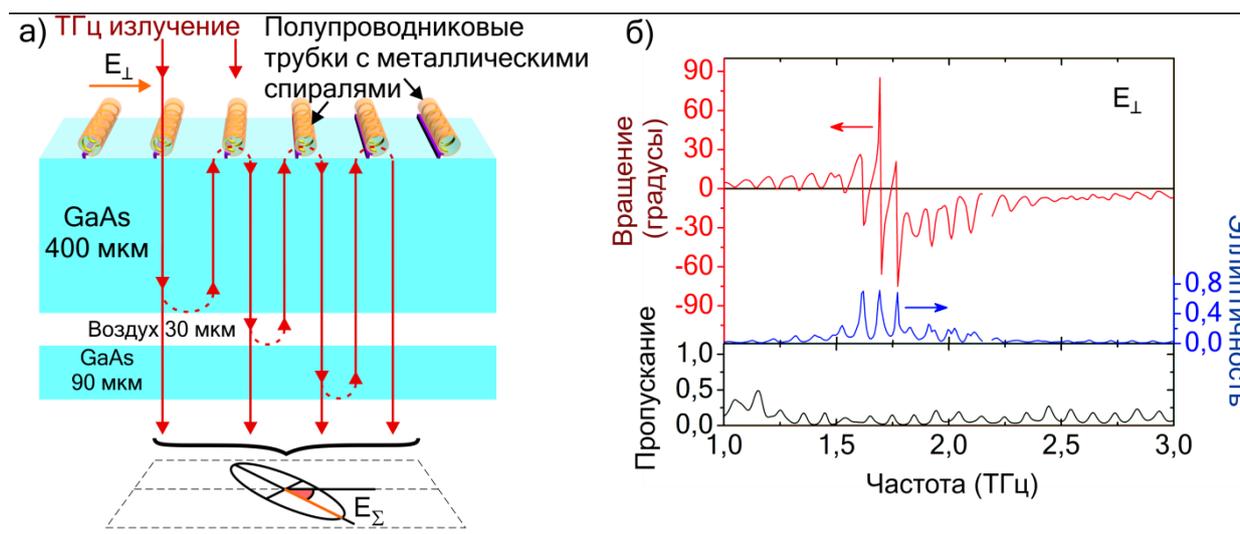
В третьей главе приводятся результаты исследования свойств ряда сформированных метаматериалов в ТГц диапазоне и анализ полученных результатов [A1, A2, A4].

В первой части главы кратко описаны методики измерений электромагнитных свойств сформированных структур в терагерцовом диапазоне. Спектры пропускания, вращения плоскости поляризации, эллиптичности проходящего излучения были измерены с помощью фурье-спектрометра Bruker IFS-66v в ИЯФ СО РАН. Прямые измерения поляризационных характеристик проходящего излучения были выполнены с помощью измерительного стенда на базе лазера на свободных электронах NOVOFEL в ИЯФ СО РАН.

Последующие части главы являются оригинальными. Во второй части представлены и проанализированы спектры системы на основе массива параллельных спиралей (рис. 4). Наблюдаемые регулярные пики объясняются в первую очередь Фабри-Перо эффектом (рис. 4а). Подложка GaAs прозрачна в исследуемом диапазоне. Угол поворота плоскости поляризации и эллиптичность излучения меняются при каждом отражении от массива спиралей из-за его высокой бианизотропии, и проходящее излучение представляет собой результат интерференции волн с различной поляризацией и фазой (рис. 4а). В третьей части главы показано резкое изменение спектров при добавлении в систему дополнительного слоя GaAs (рис. 5). В спектрах появляются более резкие пики, что объясняется усилением на некоторых частотах добротности Фабри-Перо резонатора, который образует данная система, при этом усиливается взаимодействие излучения со спиральями. Для излучения, поляризованного перпендикулярно осям спиралей ( $E_{\perp}$ ) максимальный поворот плоскости поляризации достигает  $\alpha=85^{\circ}$  на частоте  $f=1,6924$  ТГц, и  $\alpha= - 65^{\circ}$  при  $f=1,6996$  ТГц, т.е. при изменении частоты всего на  $\Delta f/f=0.4\%$  изменение угла поворота  $\Delta\alpha>150^{\circ}$ .

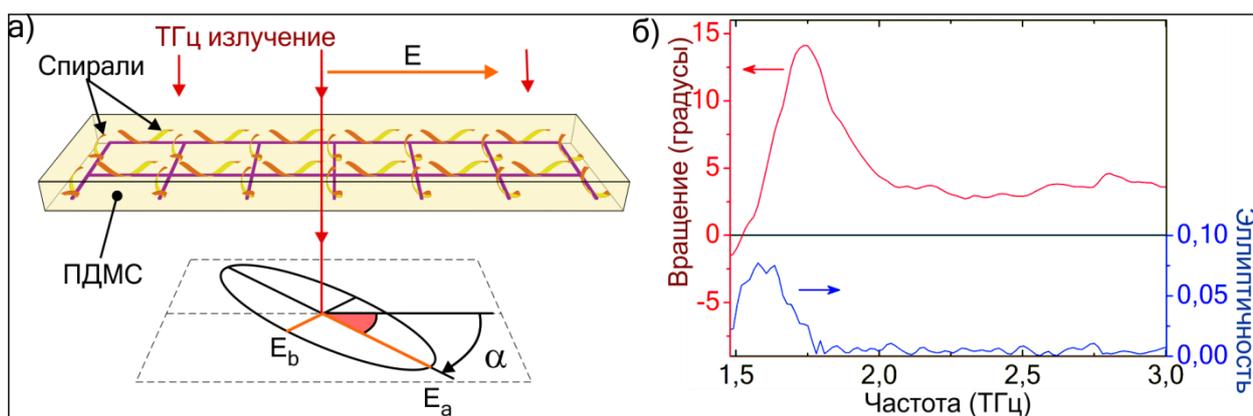


**Рис. 4** Схема и спектры системы на основе массива параллельных спиралей (спиральи-GaAs): (а) схема системы и Фабри-Перо интерференции волн с различной поляризацией:  $E_0$  – волна, прошедшая систему без переотражений,  $E_1$ ,  $E_2$  – волны, однократно и двукратно отраженные от спиралей,  $E_{\Sigma}$ – результирующая волна. Спектры пропускания, вращения плоскости поляризации и эллиптичности для излучения, поляризованного перпендикулярно осям спиралей  $E_{\perp}$  (б), и параллельно осям спиралей  $E_{\parallel}$  (в): результаты измерений на Фурье-спектрометре (линии) и на измерительной станции на базе ЛСЭ (точки).



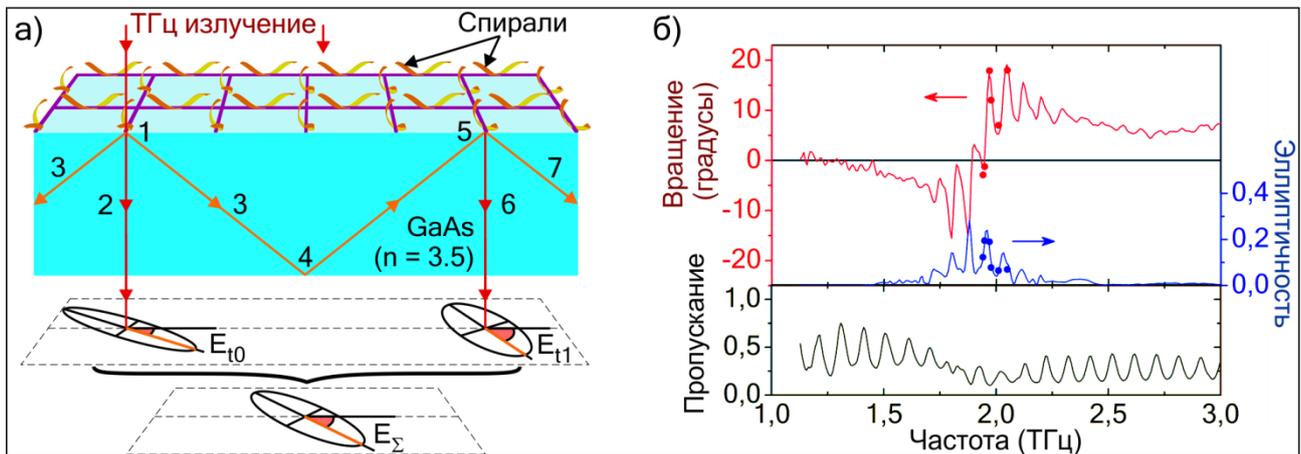
**Рис. 5** Схема и спектры системы в виде массива параллельных спиралей на двух слоях GaAs (спиральи-GaAs-воздух-GaAs). (а) схема системы и многолучевой интерференции Фабри-Перо, (б) спектры пропускания, вращения плоскости поляризации и эллиптичности для излучения, поляризованного перпендикулярно осям спиралей  $E_{\perp}$ .

В четвертой части представлены результаты исследований квадратной решетки металл-полупроводниковых спиралей, запечатанных в свободную полимерную пленку. На рис. 6а представлена схема структуры, на рис. 2б- СЭМ-изображение массива микроспиралей до запечатывания в полимерную пленку. Спектры вращения плоскости поляризации и эллиптичности этой структуры (рис. 6б) имеют достаточно простую форму, типичную для полуволнового резонанса спиралей. Благодаря симметрии массива эти спектры не зависят от ориентации плоскости поляризации, что важно для практического применения подобных вращателей поляризации в ряде устройств.



**Рис. 6** Схема и спектры квадратной решетки спиралей, запечатанной в свободную полимерную пленку. а –схема структуры; б - спектры вращения плоскости поляризации (оптической активности) и эллиптичности (кругового дихроизма).

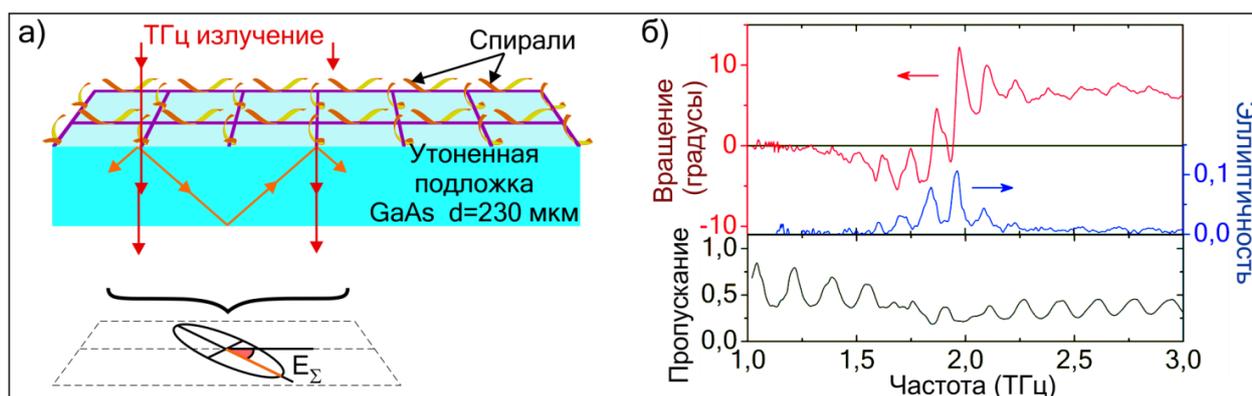
В пятой части главы представлены результаты исследований системы в виде квадратной решетки металл-полупроводниковых спиралей на подложке GaAs (рис 7а). Сравнение со спектрами такой же решетки спиралей, запечатанной в полимер, кроме очевидного сдвига полуволнового резонанса спиралей, связанного с укорочением длины волны в полимере  $\lambda = \lambda_0/n_{\text{пол}}$ , показывает возникновение в системе с подложкой необычных регулярных пиков в спектрах поляризации (рис. 7б), причем периоды для спектров вращения плоскости поляризации и эллиптичности одинаковы и меньше периода, наблюдаемого в спектрах пропускания. В спектрах пропускания основную роль играет Фабри –Перо эффект. Массив спиралей имеет ось симметрии 4 порядка, и поэтому Фабри–Перо эффект при нормальных отражениях в системе не меняет поляризации излучения и не объясняет возникновения пиков в спектрах вращения плоскости поляризации и эллиптичности. Существование пиков в этих спектрах подтверждено прямыми измерениями с помощью стенда на базе лазера на свободных электронах (рис. 7б).



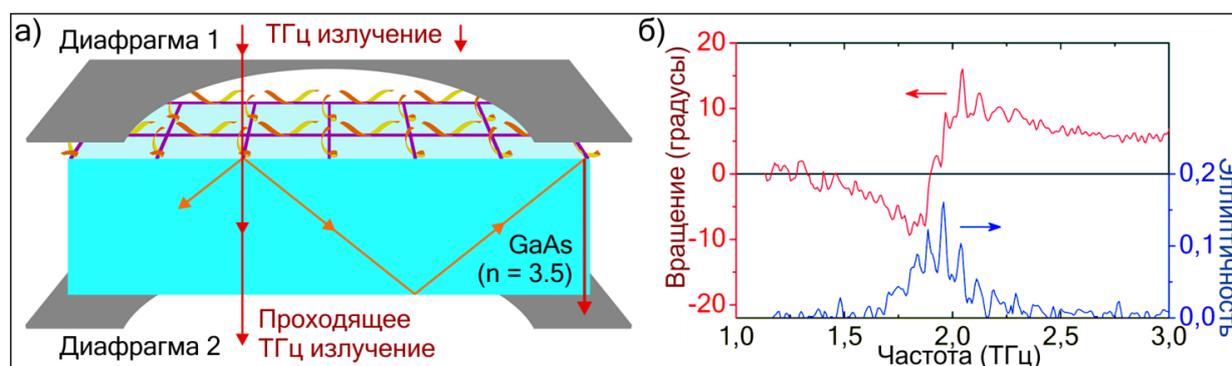
**Рис. 7** Схема и спектры системы в виде квадратной решетки спиралей на подложке (спирали-GaAs). (а) схема системы и волноводного эффекта: 1 – возбуждение спиралей падающим излучением, 2 – волна, прошедшая слой спиралей (нулевой порядок дифракции), 3 – волна первого порядка дифракции (решетка спиралей служит пропускательной дифракционной решеткой), 4 – полное внутреннее отражение, 5 – повторное возбуждение спиралей, 6 – нормальные волны, переизлученные спиральями, 7 – наклонные волны, переизлученные спиральями (решетка спиралей служит отражательной дифракционной решеткой).  $E_{t0}$  – волна, проходящая без переотражений,  $E_{t1}$  – волна после одного цикла переотражений,  $E_{\Sigma}$  – результирующая волна. (б) - спектры пропускания, вращения плоскости поляризации и эллиптичности: линии – данные, полученные на Фурье-спектрометре, точки – данные измерений с помощью стенда на базе ЛСЭ.

Данные пики объяснены своеобразным волноводным резонансом, возникающим в системе. Рис. 7а схематически иллюстрирует предлагаемый механизм этого явления. Период

решетки меньше длины волны в воздухе, но больше длины волны в подложке. За счет этого решетка спиралей играет роль дифракционной решетки, причем лучи уже первого порядка дифракции испытывают полное внутреннее отражение на тыльной стороне подложки и возвращаются к слою спиралей, т.е. подложка может рассматриваться как плоский волновод. При наклонном отражении от спиралей происходит изменение поляризации излучения, причем решетка спиралей играет роль отражательной дифракционной решетки. Принципиальным отличием от классического волноводного резонанса[12] является наличие у дифракционной решетки киральности, и, соответственно, пики наблюдаются в спектрах поляризации. Описанный механизм возникновения пиков в спектрах поляризации квадратной решетки спиралей на подложке был подтвержден двумя следующими экспериментами [A1]. Утонение подложки приводит к укорочению оптического пути и периоды в спектрах возрастают (рис. 8). Во втором эксперименте система расположена между двумя диафрагмами, и амплитуда пиков в спектрах поляризации уменьшается (рис. 9). Полученные результаты соответствуют предлагаемому механизму возникновения пиков.



**Рис. 8** Схема и спектры квадратной решетки спиралей на утоненной подложке GaAs (230  $\mu\text{m}$ ). (а) схема системы, (б) спектры пропускания, вращения плоскости поляризации и эллиптичности.



**Рис. 9** Схема и спектры системы в виде квадратной решетки спиралей на подложке, расположенной между двумя диафрагмами. (а) схема эксперимента, (б) спектры вращения плоскости поляризации и эллиптичности.

После получения данных экспериментальных результатов соавтором было выполнено полуаналитическое компьютерное моделирование [A1], которое тоже подтвердило достоверность описанного механизма возникновения пиков в спектрах поляризационных характеристик системы с осью симметрии 4 порядка (квадратная решетка микроspirалей - GaAs).

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ:**

В диссертации представлен комплекс экспериментальных работ по созданию киральных метаматериалов и систем, а также исследованию их резонансных электромагнитных свойств в терагерцовом диапазоне. Для формирования метаматериалов впервые была применена технология сворачивания напряженных нанопленок [8], что позволило сформировать принципиально новые метаматериалы в виде массивов металл-полупроводниковых микроspirалей и впервые продемонстрировать искусственную киральность в терагерцовом диапазоне. В спектрах квадратной решетки микроspirалей на подложке обнаружены необычные гигантские резкие регулярные пики, которые объяснены возникновением своеобразного кирального волноводного резонанса.

1. Разработаны метаматериалы терагерцового диапазона с трехмерными элементами-резонаторами:

а) биизотропный киральный метаматериал в виде квадратной решетки одновитковых металл-полупроводниковых спиралей (InGaAs/GaAs/Ti/Au) с осью симметрии 4 порядка (расчетная частота полуволнового резонанса спирали – 2 ТГц, период решетки- 84 мкм, диаметр спиралей -14.7 мкм);

б) бианизотропный метаматериал в виде параллельных полупроводниковых нанопленочных трубок (InGaAs/GaAs), на внутренней стороне которых расположены одновитковые металлические спиралы (Ti/Au) (расчетная частота полуволнового резонанса микроspirалей – 1.7 ТГц, период решетки- 85 мкм, диаметр трубок и спиралей - 24.8 мкм).

На основе метода сворачивания напряженных пленок разработаны технологические маршруты для воспроизводимого формирования данных метаматериалов.

2. Предложен ряд способов формирования на подложке плотных упорядоченных массивов микроspirалей, установлено, что среди них наибольшую точность и воспроизводимость обеспечивает закрепление микроspirалей на подложке дополнительными литографическими элементами.

3. Впервые продемонстрирована искусственная оптическая активность в терагерцовом диапазоне, установлено, что вращение плоскости поляризации проходящего излучения метаматериалом в виде квадратной решетки микроspirалей в полимерной пленке достигает  $14^\circ$  на частоте 1.74 ТГц. При этом удельное вращение плоскости поляризации составляет  $170^\circ/\lambda$ , т.е. выше, чем у естественных оптически-активных веществ на 3-5 порядков, и жидкокристаллических структур на 1-2 порядка (в их рабочем диапазоне). Показано, что резонансные частоты сформированных метаматериалов со спиральными металл-полупроводниковыми резонаторами соответствуют полуволновому резонансу металлических спиральных элементов.

4. В области 1-3 ТГц установлено гигантское для этого диапазона вращение плоскости поляризации системами на основе сформированных метаматериалов и плоскопараллельных слоев GaAs:

19°, система: квадратная решетка микроspirалей– GaAs (400 мкм),

32.6°, система: параллельные микроspirали– GaAs (400 мкм),

85°, система: параллельные микроspirали– GaAs (400 мкм)– воздушный зазор (30 мкм)– GaAs(90 мкм).

5. В спектрах вращаения плоскости поляризации и эллиптичности проходящего излучения всех систем на основе сформированных метаматериалов и плоскопараллельных слоев GaAs обнаружены резкие регулярные пики. Например, в системе параллельные спиралы – GaAs (400 мкм)-воздух (30 мкм)-GaAs(90 мкм) при поляризации падающего излучения перпендикулярно осям спиралей изменение частоты излучения на 0.4% приводит к изменению угла вращаения поляризации проходящего излучения  $>150^\circ$ .

6. Регулярные пики в спектрах вращаения плоскости поляризации и эллиптичности проходящего излучения систем на основе параллельных микроspirалей и слоев GaAs объяснены Фабри-Перо резонансом и высокой бианизотропией метаматериала в виде параллельных микроspirалей.

7. Установлено, что регулярные пики в спектрах вращаения плоскости поляризации и эллиптичности проходящего излучения сформированной системы с осью симметрии 4 порядка (квадратная решетка микроspirалей–GaAs) возникают за счет своеобразного волноводного резонанса, связанного с дифракцией излучения на киральной решетке.

**Результаты диссертации изложены в следующих работах:**

**Статьи и патент**

A1. Terahertz metamaterials and systems based on rolled-up 3D elements: designs, technological approaches / V.Y.Prinz, E.V.Naumova et al. // Scientific Reports. – 2017. - 43334. URL: <http://www.nature.com/articles/srep43334>.

A2. Manufacturing chiral electromagnetic metamaterials by directional rolling of strained heterofilms / E.V.Naumova et al // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. - 2009. -V. 11. N 7. - 074010.

A3. Investigation of electromagnetic properties of a high absorptive, weakly reflective metamaterial—substrate system with compensated chirality / I.V.Semchenko,... E.V.Naumova et al. // Journal of Applied Physics. - 2017. – V. 121, N 1. - 015108.

A4. Research highlights from the Novosibirsk 400 W average power THz FEL / G.N.Kulipanov,... E.V. Naumova et al. // International Journal of Terahertz Science and Technology. 2008. - V. 1, N 2. — p.107.

A5. Исследование свойств слабо отражающих метаматериалов с компенсированной киральностью / И.В.Семченко,... Е.В.Наумова и др. // Кристаллография. - 2014. -Т. 59, N 4. - С.544.

A6. Исследование свойств искусственных анизотропных структур с большой киральностью / И.В.Семченко,... Е.В.Наумова и др. // Кристаллография. - 2011. -Т. 56, N 3. - С.398.

A7. Киральные метаматериалы терагерцового диапазона на основе спиралей из металл-полупроводниковых нанопленок / Е.В.Наумова и др. // Автометрия. - 2009. -Т. 45, N 4. - С.12.

A8. Структура с киральными электромагнитными свойствами и способ ее изготовления : пат. 2317942 Рос. Федерация : МПК(2006.01) В82В 3/00 /Е. В. Наумова, В.Я. Принц. – № 2006122901/28 ; заявл. 27.06.2006 ; опубл. 27.02.2008, Бюл. № 6. – 54 с.: 10 ил.

**Тезисы/расширенные тезисы конференций**

A9. Fabrication of metamaterials on the basis of precise micro- and nanoshells. / E.V. Naumova et al. / Proc. of 1st Int. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics "Metamaterials 2007", Rome, Italy, 22-24 October, 2007. P. 74-77.

A10. Polarization rotation of THz radiation by an array of helices / E.V. Naumova et al. // Conf. Digest of 2006 Joint 31st Int. Conf. on IR and MW and 14th Int. Conf. on THz Electronics, 18-22 September, 2006. P. 351.

A11. Metamaterials on the Basis of Precise Micro-and Nanoshells / V.Y. Prinz, E.V. Naumova et al. // Progress in Electromagn. Research Symp., Hangzhou, China, March 24-28, 2008. P. 853.

A12. Metamaterials based of three-dimensional semiconductor nano-structures / V.Y. Prinz, E.V. Naumova et al. // 2nd European Topical Meeting on Nanophotonics and Metamaterials “NANOMETA-2009”, Seefeld, Tirol, Austria, 5-8 January, 2009.

A13. New electromagnetic metamaterials based on precise metal-semiconductor shells / E.V. Naumova et al. // 19th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology”, Ekaterinburg, Russia, June 20–25, 2011. P. 95.

A14. Novel continuous regular 3D micro- and nanoshell systems design, fabrication, study and possible applications / E.V. Naumova et al. // Proceedings of 14th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology”, St Petersburg, Russia, June 26–30, 2006. P. 107-108.

A15. Polarization transformation by arrays on the basis of precise metal-semiconductor microhelices / E.V. Naumova et al. // 15th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology”, Novosibirsk, Russia, June 25–29, 2007. P. 164-165.

A16. Prinz, V.Y. Metamaterials on the basis of three-dimensional resonators / V.Y. Prinz, E.V. Naumova // 15th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology”, Novosibirsk, Russia, June 25-29, 2007.

A17. High Power THz Applications on the NovoFEL / R.R. Akberdin...E.V. Naumova et al. // 34th Int. Conf. on IR, MM, and THz Waves, Busan, Korea, 21-25 September, 2009. P. 858-860.

A18. Terahertz research activities at Novosibirsk free electron laser / V.S. Cherkassky...E.V. Naumova et al. // Proc. of Workshop “New scientific possibilities with high power THz sources”, Daresbury Laboratory, UK, , June 29-30, 2006.

A19. Novosibirsk terahertz free electron laser: Facility development and new experimental results at the user stations / B.A. Knyazev...E.V. Naumova et al. // 36th Int. Conf. on IR, MM, and THz Waves, Houston, Texas, USA, October 2 - 7, 2011. P. 6105077.

A20. Novosibirsk high-power terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements / B.A. Knyazev...E.V. Naumova et al. // Proc. of 9th Int. Symp. on measurement technology and intelligent instruments, Saint - Petersburg, 29 June - 2 July, 2009. Vol.4, P. XLIV-XLVIII.

A21. Chiral metamaterial formed by 3D-printing and shadow vacuum deposition / S.V. Golod ... E.V. Naumova et al. // Proc.of 24th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology”, St Petersburg, June 27–July 1, 2016. P. 208-209.

A22. Terahertz optical activity and metamaterial properties of 2D array of metal-semiconductor microhelices / V.V. Kubarev...E.V. Naumova et al. // 34th Int. Conf. on IR, MM and THz Waves, Busan, Korea 21-25 September, 2009. P. 867-868.

A23. Strong chiral properties of helically-structured metamaterials in THz range / I.V. Semchenko...E.V. Naumova et al. // 5th Int. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in MW and Optics Metamaterials, Barcelona, Spain 10-13 October, 2011. P. 36-38.

A24. 2D isotropic metamaterial with equal permittivity and permeability in THz range / I.V. Semchenko...E.V. Naumova et al. // 6th Int. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in MW and Optics Metamaterials, St. Petersburg, Russia, 17 – 22 September, 2012. P. 571-573.

A25. Эксперименты на рабочих станциях терагерцового Новосибирского ЛСЭ / Н.А. Винокуров...Е.В. Наумова и др // Всеросс семинар по р/физике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, Ин-т прикл. физики, 12-15 марта, 2007. С. 57-58.

A26. Терагерцовое излучение в исследованиях твердого тела, полупроводников, метаматериалов и сверхбыстрой спектроскопии газов / В.В. Кубарев...Е.В. Наумова и др. // VIII Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, г. Нижний Новгород, 1 - 4 марта 2011, 2011. С. 15.

A27. Киральные метаматериалы на основе прецизионных металл-полупроводниковых спиралей. / Е.В. Наумова и др. // Тезисы докл. IX Российской конф. "Полупроводники 2009", Новосибирск-Томск, 28 сентября - 3 октября, 2009. С. 290.

A28. Комплексная система на основе кирального метаматериала для сверхбыстрого управления поляризацией излучения / В.Я. Принц, Е.В. Наумова и др. // XI Российская конф. по физике п/п, г. Санкт-Петербург, 16 -20 сентября, 2013. С. 88.

#### **Список цитируемой литературы:**

1. Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона / В.М. Исаев и др. // Докл. Томского гос. ун-та сист.управл. и радиоэл.– 2014.– Т. 4 (34).– С. 5.
2. Гуляев, Ю.В. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения / Ю.В. Гуляев, А.Н. Лагарьков, С.А. Никитов // Вестн. РАН.– 2008.– Т. 78.– N. 5.– С. 438.
3. Shaltout, A.M. Evolution of photonic metasurfaces: from static to dynamic / A.M. Shaltout, A.V. Kildishev, V.M. Shalaev // Journal of the Optical Society of America B.– 2016.– V. 33.– N. 3.– P. 501.
4. Nanofabricated media with negative permeability at visible frequencies / A.N. Grigorenko et al. // Nature.– 2005.– V. 438.– N. 7066.– P. 335.

5. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity / D.R. Smith et al. // *Physical Review Letters*.– 2000.– V. 84.– N. 18.– P. 4184.
6. Shelby, R.A. Experimental verification of a negative index of refraction / R.A. Shelby, D.R. Smith, S. Schultz // *Science*.– 2001.– V. 292.– N. 5514.– P. 77.
7. Lindman, K.F. Über eine durch ein isotropes System von spiralförmigen Resonatoren erzeugte Rotationspolarisation der elektromagnetischen Wellen / K.F. Lindman // *Annalen Der Physik*.– 1920.– V. 368.– N. 23.– P. 621.
8. Free-standing and overgrown InGaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays / V.Ya. Prinz et al. // *Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures*.– 2000.– V. 6.– N. 1-4.– P. 828.
9. Prinz, V.Ya. A new concept in fabricating building blocks for nanoelectronic and nanomechanic devices / V.Y. Prinz // *Microelectronic Engineering*.– 2003.– V. 69.– N. 2-4.– P. 466.
10. Semchenko, I.V. Chiral metamaterial with unit negative refraction index / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, S.A. Tretyakov // *The European Physical Journal Applied Physics*.– 2008.– V. 46.– N. 3.– P. 32607.
11. Semchenko, I.V. Polarization Plane Rotation of Electromagnetic Waves by the Artificial Periodic Structure with One-Turn Helical Elements / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov // *Electromagnetics*.– 2006.– V. 26.– N. 3-4.– P. 219.
12. Guided-Mode Resonances in Planar Dielectric-Layer Diffraction Gratings / S.S. Wang et al. // *Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision*.– 1990.– V. 7.– N. 8.– P. 1470.