

на правах рукописи



Мазинов Алим Сеит-Аметович

**ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С
ПРОВОДЯЩИМИ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ СРЕДАМИ**

1.3.4 – Радиофизика

1.3.11 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Воронеж - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского».

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор
Старостенко Владимир Викторович

Официальные оппоненты: **Скрипаль Александр Владимирович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г.
Чернышевского», институт физики, кафедра физики
твёрдого тела, заведующий кафедрой

Копытов Геннадий Филиппович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Московской государственной академии наук и
технологий им. К.Г. Разумовского (Первый казачий
университет), кафедра физики, заведующий кафедрой

Котов Геннадий Иванович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Воронежский государственный университет
инженерных технологий", кафедра физики,
теплотехники и теплоэнергетики, профессор кафедры

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»,
г. Нижний Новгород

Защита состоится **19 мая 2022 г.** в 15:10 на заседании диссертационного совета
24.2.288.05 при Воронежском государственном университете по адресу: 394018,
г. Воронеж, Университетская площадь, 1, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного
университета и на сайте: <http://www.science.vsu.ru/dissinfo&cand=3379>.

Автореферат разослан _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.288.05



Степкин Владислав Андреевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Состояние и тенденции развития информационных технологий приводят к необходимости исследования электродинамических свойств наноразмерных и наноструктурированных сред взаимодействующих с электромагнитными волнами (ЭМВ), для которых особо стоит выделить два частотных диапазона. Первый – от единиц до сотни гигагерц (сверхвысокочастотный диапазон, СВЧ), в основном задействован в мобильных соединениях точка-точка, радарных системах и т.д. Второй - от десятков до нескольких сотен терагерц (оптический диапазон), обеспечивает потоковую передачу информации в волоконных и спутниковых каналах связи.

При этом, основной радиофизической задачей остается выявление особенностей преобразования энергии электромагнитных волн на объектах, линейные размеры которых на несколько порядков, меньше, чем длина волны. Интерес к физическим и электродинамическим свойствам проводящих пленок обусловлен не только тем, что они используются в кондуктивных элементах связи, обеспечивающих работу устройства, но и их физическими свойствами, зависящими от толщины пленок. Одно из самых существенных свойств нанометровых проводящих пленок – это аномально высокое поглощение при толщинах в несколько нанометров, причем эта связь наноразмерных элементов обусловлена, с одной стороны электродинамическими свойствами самих структур, а с другой – их связью с полями электромагнитных волн, воздействующих на подобные структуры. Это позволяет использовать радиофизические подходы для исследования физических свойств наноразмерных и наноструктурированных сред, сформированных на основе проводящих и полупроводниковых материалов, а также различных композиционных структур.

Подобные неординарные характеристики могут быть востребованы с точки зрения радарных свойств. Добиться максимального коэффициента поглощения, при минимальной массе антиотражающих покрытий, возможно при комплексном использовании многослойных покрытий на базе металл-углеродных покрытий. Более глубокое понимание физики построения наноструктурированных производных углерода, которые могут обладать как металлической, так и полупроводниковой проводимостью, дало новый толчок к изучению общих закономерностей трансформации и преобразования волн не только в СВЧ, но и оптическом частотном диапазоне.

При этом, актуальная задача современной радиоэлектроники, повышения частотной селективности при высоком коэффициенте преобразования, решается посредством использования наноструктурированных углеродных материалов: фуллеренов, графенов и нанотрубок. Именно в сочетании с необычными дифракционными свойствами металлизированных тонких плёнок, подобные композитные среды возможно использовать при создании защитных экранов, резонаторов, фильтров и других элементов волновой схемотехники. Именно они позволят удовлетворить жёсткие требования, предъявляемые к масс-габаритным характеристикам радио- и оптоэлектронного оборудования. А использование переизлучательных свойств углеродных структур, в различных органических модификациях, позволит расширить спектр излучения современных оптоэлектронных приборов: твердотельных лазеров, светодиодов и т.д.

Другой актуальной проблематикой электромагнитной совместимости является всевозрастающая плотность излучаемых мощностей, которая в импульсе легко может превышать мегаваттный уровень на единицу площади полупроводниковой

микросхемы. Естественным образом, для элементов радиоэлектронной аппаратуры, имеющих микро- и нанометровые размеры, наведенная паразитная мощность значительно превышает рассеиваемую энергию, что приводит к тепловым деградациям приборов.

Востребованность в точности модельного описания радиофизических закономерностей распространения, взаимодействия и трансформации электромагнитных волн в наноразмерных структурах требует обеспечения всестороннего подхода к моделированию поглощения и преобразования волновой энергии, начиная от простейших приближений, с усреднёнными параметрами структуры, и заканчивая квантованием наноразмерной системы, требующей учета волновых свойств электронов и определения электронных спектров материалов и композиционных соединений.

Актуальность темы диссертации следует из практических приложений, связанных с использованием проводящих и полупроводниковых сред в различных приборах и устройствах, использования в работе радиофизических подходов и экспериментальных методик для исследования пространственно и омически неоднородных структур, возможности практического использования наноразмерных проводящих сред для оптимального выбора размеров функциональных элементов изделий полупроводниковой микроэлектроники.

Цель работы. Установление радиофизических закономерностей и связей при взаимодействии и трансформации электромагнитного излучения сверхвысококачастотного, инфракрасного и видимого диапазонов с наноразмерными и наноструктурированными искусственными средами, сформированными на основе металлизированных, кремниевых, углеродных и органических материалов. Обоснование физических механизмов преобразования волновой энергии в неоднородных и нелинейных, проводящих и полупроводниковых структурах

В соответствие с целью диссертационной работы необходимо было решить следующие задачи:

- выбрать и обосновать методики и методы экспериментальных исследований, позволяющие установить связи параметров сверхвысококачастотных и оптических электромагнитных волн с характеристиками искусственных наноразмерных и наноструктурированных сред различной природы;

- в СВЧ и оптическом диапазонах экспериментально исследовать влияния на соотношения между относительными мощностями отраженной, прошедшей и поглощенной волн в долях падающей волны в волноводе (свободном пространстве), и физические свойства проводящих и полупроводниковых материалов, с учетом поляризационного фактора;

- экспериментально исследовать воздействие СВЧ электромагнитных полей (ЭМП) на металлодиэлектрические структуры (МДС), приводящее к пробоям проводящих слоев, осажденных магнетронным и ионным методами на твердые и гибкие подложки, а также выяснить природу и характерные особенности развития пробоя в широком диапазоне частот;

- обосновать зависимость аномального поглощения энергии СВЧ ЭМП от толщины наноразмерных проводящих структур, удельной проводимости и электродинамических свойств МДС;

- разработать теоретические модели разного уровня погружения, позволяющие выявить основные радиофизические закономерности преобразования волновой энергии в тепловую и другие виды энергии с учетом влияния пространственной и

омической неоднородности, удельной проводимости от толщины и других особенностей, и параметров проводящих и полупроводниковых материалов, а также композитных структур на их основе;

- дать теоретическое описание экспериментально полученных явлений поглощения электромагнитных волн оптического диапазона в неоднородных и нелинейных средах, сформированных на основе полупроводниковых однослойных и многослойных структур.

Объект исследования – физические явления и электродинамические процессы преобразования энергии электромагнитных волн в другие виды энергий в наноразмерных проводящих, полупроводниковых и композитных средах в различных диапазонах частот.

Методы исследования. В процессе проведения исследований был задействован широкий комплекс методов и методик, которые опирались на связь теоретических и экспериментальных радиофизических подходов. Экспериментальные результаты были получены на стандартном сертифицированном оборудовании и специализированных стендах, с обвязкой из поверенной измерительной аппаратуры. В высокочастотных диапазонах использовались как волноводные методы, так и методы исследования дифракционных характеристик в открытом пространстве с соблюдением метрологических требований. Волноводные исследования проводились на панорамных измерителях P2-56/61/66 и P4226 в соответствующих диапазонах частот с подложками из боросиликатного стекла, ситалла, лавсана и фторопласта с тонкопленочными средами из меди, алюминия, нихрома титана, углерода, кремния и других материалов. В инфракрасном диапазоне использовались стандартные закрытые камеры, в видимом – развернутые линейные схемы с широкополосными и селективными источниками излучения.

Для измерения проводящих свойств пленочных образцов использовался ряд стандартных измерителей характеристик полупроводниковых приборов Л2-56, В1500 и специальных схем с использованием поверенных стабилизированных источников питания, микро- и наноамперметров, тераомметров и низкочастотных генераторов. Геометрия и непосредственная структура подложек и осажденных пленочных слоев анализировалась интерференционной оптической, электронной и атомно-силовой микроскопиями с привлечением рентгенографии.

При решении волнового уравнения использовались сеточные методы: FDTD с базисом «пространство-время», в методе связанных волн применялся базис «пространство-спектр», значительно влияющий на степень адаптивности сетки. Кроме этого использовались соотношения для баланса мощностей при дифракции на объекте. При решении уравнения теплопроводности использовался метод независимых тепловых потоков. Для нахождения соотношений удельной проводимости металлов в нанометровых средах использовалось кинетическое уравнение Больцмана, которое также использовалось для анализа преобразования оптического излучения в полупроводниковых средах в другие виды энергии. При рассмотрении более глубокой физики взаимодействия электромагнитных волн с металлизированными и полупроводниковыми материалами, учитывались волновые свойства электронов посредством решения уравнения Шредингера для идеальных и неупорядоченных систем.

Значимость практических и теоретических результатов. Практическая значимость исследований определяется результатами экспериментов, полученных в 3D-измерениях для многочисленных наноразмерных и наноструктурированных

проводящих, полупроводниковых и диэлектрических сред при воздействии электромагнитных полей. Результаты исследований являются необходимыми при разработке новых электронных приборов, датчиков, различных функциональных модулей, поглощающих покрытий и т.д.

Установленные закономерности по взаимодействию электромагнитного излучения СВЧ диапазона, с наноразмерными проводящими и углеродными тонкопленочными средами, могут быть использованы для получения широкополосных поглощающих покрытий, не только на твердых, но и на гибких основах. Кроме этого, полученные результаты являются необходимыми при конструировании и использовании аппаратуры с пространственно и омически неоднородными проводящими пленками (контактные площадки, кондуктивные элементы микроэлектроники и т.д.).

Закономерности, установленные в результате поглощения волн оптического диапазона на кремниевых, углеродных и органических материалах могут быть использованы при развитии физических принципов работы и реализации электронных и оптоэлектронных полупроводниковых приборов, интегральных устройств, в частности построении приёмников и излучателей терагерцового диапазона, базирующихся на гетероструктурах.

Модели, разного уровня погружения, базирующиеся на законах сохранения энергии, численных методах решения волнового уравнения, кинетическом уравнении Больцмана, основанные на квантовых подходах при описании электронной подсистемы сложных наноразмерных структур, на основе проводящих и полупроводниковых материалов, являются необходимым инструментом для дальнейших исследований преобразования ЭМ волн и могут использоваться для оптимизации параметров новых компонентов микроэлектроники, приемников и преобразователей электромагнитного излучения.

Научные положения, выносимые на защиту.

- Природа аномального поглощения электромагнитного излучения гигагерцевого диапазона сверхтонкими проводящими покрытиями обусловлена резистивными потерями, которые обусловлены островковой структурой тонкопленочной среды.
- Деградиционные воздействия мощных полей на тонкопленочные металлизированные среды стимулируют тепловой пробой, направленный перпендикулярно электронной компоненте падающей электромагнитной волны. При этом, тепловому разрушению наиболее подвержены пленки толщиной в пределах 4 -8 нм.
- Переход от островковой структуры тонких пленок к структуре с каналами проводимости обуславливает поглощение СВЧ излучения до 50% и нелинейное увеличение отражения волн видимого диапазона.
- Поглощение сверхтонкими металлизированными средами слабо зависит от частоты. У плёнок, полученных на основе фуллеренов, поглощающие способности возрастают на больших частотах.
- Аналитическая зависимость проводимости от толщины металлизации может быть описана зависимостью типа экспонента в минус первой степени, с максимумом проводимости, равным проводимости объемного материала.
- Нарушение периодичности атомной решетки взаимодействующих с излучением металлизированных структур приводит к расщеплению энергетических зон и образованию запрещенной зоны, до 0,08 эВ, что обуславливает уменьшение проводимости до 10^6 См/м и нелинейное поглощение волновой энергии.

- Край фундаментальной полосы поглощения аморфных пленок кремния смещается в сторону меньших частот при легировании оборванных связей водородом. Оптическая ширина запрещенной зоны пленок фуллерена может управляться использованием различных растворителей. Допирование молекулярной структуры гидразонов азотом, фтором и бором приводит к возникновению люминесцентных свойств, меняя ширину оптической запрещенной зоны в пределах 2,5 – 3 эВ.

- Взаимодействие электромагнитного излучения с дефектной структурой немонокристаллических полупроводников представляется суммой поглощений на различных видах дефектов, при этом однотипные дефекты имеют подобные резонансные частоты поглощения и могут быть описаны псевдопериодичностью.

- Смещение максимума поглощения электромагнитного кванта, связанное с переходом электрона из валентной зоны в зону проводимости, обусловлено псевдокристаллическостью аморфной среды. Общий коэффициент поглощения представляется суммой псевдокристаллической и псевдопериодической дефектной составляющих неидеальной структуры пленки.

Научная новизна:

1. Обнаружено влияние пространственной и омической неоднородностей проводящих наноразмерных слоистых структур на процессы преобразования энергии ЭМП в тепловую энергию.
2. Установлены закономерности изменения оптических коэффициентов тонких проводящих сред на подложках, имеющих неоднородность морфологии поверхности, в зависимости от толщины, метода осаждения и типа подложки.
3. Выявлена взаимосвязь аномального поглощения сверхтонкими металлическими пленками в СВЧ диапазоне, нелинейным возрастанием отражения в терагерцовом спектре с формированием проводящей структуры металлизированных пленок в пределах толщин 5 – 7 нм.
4. Определены условия деградации пленочных структур при воздействии мощных импульсных полей СВЧ диапазона для толщин от 3 нм и выше, при которых тепловой пробой проводящей среды развивается перпендикулярно к электрической компоненте падающей электромагнитной волны.
5. Проведен сравнительный анализ коэффициентов стоячей волны и ослабления для пленок алюминия, кремния, углерода и органических материалов, в котором выделена трансформация электромагнитного излучения на модификациях углерода (C_{60} , C_{70}) на частотах выше 20 ГГц аналогично преобразованиям на проводящей среде.
6. Показана возможность управлять смещением края фундаментальной полосы поглощения от 0,6 до 1 мкм на основе экспериментальных данных по изменению спектров поглощения гидрогенизированного аморфного кремния, полученного магнетронным методом, в зависимости от концентрации водорода.
7. Обнаружена зависимость частотных свойств пленок самоорганизованных фуллереновых сред, осажденных из взвесей различных растворителей, которые показали возможность смещения фундаментальной полосы поглощения в пределах 1,74 – 1,91 эВ.
8. Представленные спектры переизлучения, для нелинейных органических систем на основе 3-метил-1-фенил-4-формил-пиразол-5-он и 4-метилфенилгидразона N-изоамилизатина, демонстрируют возможность смещения спектров переизлучения в более длинноволновую область посредством модернизации исходных молекул.

9. Показано, что добавление гидразона позволило усилить (~30 раз) оптоэлектронные свойства полупроводниковых гетероструктур, на основе фуллерена C_{60} .

10. Предложена аналитическая зависимость проводимости тонких структур в зависимости от толщины металлизации.

11. На примере дисперсионной зависимости для монокристаллической пленки алюминия, имеющей проводимость $\sigma_0 = 3.8 \cdot 10^7$ См/м, показано, что по мере нарушения периодичности расположения потенциальных ям, внутри элементарной атомной ячейки, сплошная энергетическая зона разбивается на несколько зон с образованием запрещенной зоны $E_g = 0.08$ эВ, в результате чего проводимость падает до $1.8 \cdot 10^6$ См/м.

12. Модельная трансформация и взаимодействие оптических электромагнитных волн с некристаллическими полупроводниками, в пределах фундаментальной полосы поглощения, представлены суммой коэффициентов поглощения на квазикристаллической и псевдопериодической дефектной составляющих неоднородных и нелинейных сред.

Достоверности результатов. Достоверность представляемых результатов, подтверждается применением корректных физико-математических экспериментальных и теоретических методов описания радиофизических закономерностей, которые коррелируются с физическими представлениями и результатами ведущих российских и зарубежных научно-исследовательских групп, работающих в данном направлении.

Апробирования диссертационной работы. Весь материал, изложенный в диссертационной работе, регулярно представлялся в более чем пятидесяти международных и региональных конференциях и симпозиумах, в течение более тридцати лет. Серии конференций: с 2000 года по настоящий момент на международных Крымских конференциях в г. Севастополе «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», периодичность один год; с 2000 года по настоящий момент, с интервалом в два года, на международных конференциях «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» в г. Санкт-Петербурге, ФТИ им. Иоффе; на XVIII и XIX международных научно-технических конференциях «Силовая электроника и энергоэффективность» в 2012 и 2013 в г. Алуште; на 7-ой по 11-ой международных научно-технических конференциях «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» с 2011 по 2015 года в г. Севастополе; с 2008 года, с периодичностью один год, в международ. конференциях «Возобновляемая энергетика XXI века»; на пятой и шестой международ. конференциях «Функциональная база нанoeлектроники» в 2012 и 2013 годах, г. Харьков; на второй и третьей международ. науч.-тех. конференциях «Физико-технологические проблемы радиотехнических устройств, средств телекоммуникаций, нано- и микроэлектроники» в 2012 и 2013г. в г. Черновцы; на второй и третьей международ. научно-практических конференциях «Полупроводниковые материалы, информационные технологии и фотовольтаика» в 2013 и 2014 года в Кременчуге.

Единичные конференции: «Физика окисных пленок» 1991, г. Петрозаводск; III Всесоюзная конференция, 1991, Кишинев; VIII Всесоюзной научной конференции, 1991, г. Санкт-Петербург; «32-й всесоюзный семинар по моделированию на ЭВМ радиационных и других дефектов в кристаллах», 1991, г. Минск; международ. конференция "Современные проблемы физики полупроводников и диэлектриков", 1995, г. Ташкент; международ. конференция "Актуальные проблемы физики

полупроводниковых приборов», 1997, г.Ташкент; международный научно-технический семинар «Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах», 1998, г.Москва; 10th International conference nonlinear optics of liquid and photorefractive crystals, 2004; International Conference “Functional Materials”, ICFM, 2005; «Electronics and nanotechnology» Proceeding of the XXXI International Scientific conference, 2011; V-й международной научной конференции «Функциональная база нанoeлектроники», 2012; Alushta; International young science meeting on Optics and optical engineering Science works proceeding, 2012, Sevastopol; шестая Всеукраиню конеренц. по физики полупроводников, 2013, г.Киев; International Conferences “Nanomaterials: Applications and Properties”, Sumy–Alushta, 2013; Symposium “The 15th International Symposium on Advanced Organic Photonics”, 2015, Moscow.

Публикации. Публичная апробация данных представлена в более чем 50 печатных работах, в журналах различного уровня, 29 из которых входят в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, более 25 – из перечня рецензируемых научных изданий и справочной информации об отечественных изданиях, которые входят в международные реферативные базы, согласно нормативных документов ВАК РФ. А также в других журналах ВАК РФ по смежным специальностям, свидетельстве о регистрации программы на ЭВМ.

Личный вклад автора. Как теоретические, так и экспериментальные результаты, представляемые к защите, получены соискателем лично на кафедре радиофизики Крымского федерального университета (КФУ). На начальных этапах научной деятельности, соискатель формировал технологические карты по получению экспериментальных образцов, а также отвечал за разработку и формирование измерительных комплексов по исследованию взаимодействия электромагнитных волн с проводящими и полупроводниковыми средами. Дальнейшие научные исследования, включая разработку теоретических моделей тонкопленочных структур, осуществлялись при непосредственном его руководстве. Все первичные экспериментальные спектры, в сверхвысокочастотном и оптическом диапазонах, получены автором лично, в ручном или полуавтоматическом режимах. Теоретическое моделирование взаимодействия осуществлялось при тесном сотрудничестве с сотрудниками и аспирантами кафедр радиофизики, теоретической физики и дифференциальных уравнений КФУ. В общем, в представленной работе, активное участие принимали ученые из научно-исследовательских групп Российской Федерации (Москва, Санкт-Петербург), Украины (Харьков, Киев, Запорожье), Узбекистана (Ташкент), на которых автор ссылается по ходу изложения текста диссертации. Анализ теоретических результатов и их компиляция с полученными экспериментальными данными, личных и других научно-исследовательских групп, представляемые в диссертации, является авторской интерпретацией.

Взаимосвязь диссертации с научными программами, темами и грантами. Исследования, представленные в диссертации, были получены в ходе выполнения следующих работ: госбюджетная тема №0198U002932 кафедры радиофизики и электроники Таврического национального университета им. В.И. Вернадского «Исследование пробоя в полупроводниковых приборах и микросхемах при воздействии электромагнитных полей и моделирование режимов работы полупроводниковых и электровакуумных приборов»; гос. тема МОН Украины, 0107U004132, «Экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия импульсных полей с микро- и наноэлементами», 2012 г.; грант МОН Украины, 0111U000507, «Нелинейная дифракция и напряженные токовые режимы в слоистых

металлодиэлектрических структурах под воздействием мощных электромагнитных полей», 2012 г.; международный проект “BSUN Joint Master Degree Study Program on the Management of Renewable Energy Sources – ARGOS”, «Развитие образования в области возобновляемых источников энергии», 2013 г.; государственная тема Министерства образования и науки Украины, номер гос. регистрации 0113U000216, «Нелинейные дифракционные явления в пленочных структурах при воздействии электромагнитных полей», 2009 – 2014 гг.; государственная тема Министерства образования и науки Украины (номер гос. регистрации 0198U002932, «Исследование пробоя в полупроводниковых приборах и микросхемах при воздействии электромагнитных полей и моделирование режимов работы полупроводниковых и электровакуумных приборов», 2014 г.; научно-исследовательская работа по договору-оферте с ОАО НПО «Исток», «Исследование возможности создания диапазонных поглощающих покрытий на полимерных подложках с нанометровыми проводящими пленками» (шифр «Про плен»), 2018 г.; научно-исследовательская работа (регистрационный номер НИОКТР АААА-А16-116112810102-0, «Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования нанометровых пленочных, включая активные, структур для современной электроники», 2016 – 2021 гг.

Объём и основная структура работы. Общий объём представляемой диссертационной работы составляет 327 страницы, которые содержат введение, 6 глав, заключение и список литературных источников. Число рисунков (Рис.) – 180. Количество таблиц – 5. Число цитируемых литературных источников – 299.

Содержание работы

Введение определяет основные направления диссертации, формулирует постановку и методы решения последовательности перспективных радиофизических задач. Обоснована актуальность темы диссертации, раскрыты цели и основные задачи исследований, определены практическая значимость и научная новизна, сформулированы основные положения.

Первая глава – рассматривает преобразование энергии электромагнитных волн при воздействии на наноразмерные и наноструктурированные среды, связь характеристик и параметров среды с отраженными, прошедшими и поглощенными волнами. Показана повышенная восприимчивость нанoeлектроники к электромагнитным полям и обоснована актуальность исследований физических явлений при взаимодействии электромагнитных волн с проводящими и полупроводниковыми средами. Рассмотрены особенности взаимодействия электромагнитных волн терагерцового диапазона, проведён выбор материалов и предложены методы формирования наноразмерных проводящих и полупроводниковых структур на базе металлов (Al, Cu, Ti,..), полупроводников (Si, C и органических соединений).

Вторая глава – описаны экспериментальные методы и методики проведения исследований по взаимодействию электромагнитного излучения в полосе частот 2 – 26 ГГц, 1 – 30 ТГц и 330 – 950 ТГц со средами, имеющими наноразмерную метрику. При исследовании дифракционных зависимостей в СВЧ диапазоне были использованы два метода: волноводный и в свободном пространстве. Экспериментально дифракционная задача в волноводе, в приближении основной

волны для дальней зоны, реализовывалась на панорамных измерителях (P2-56/61/66, P4226,...) посредством измерения коэффициентов стоячей волны k_w и ослабления k_a , Рис. 1, или S -параметров (S_{11} , S_{21}).

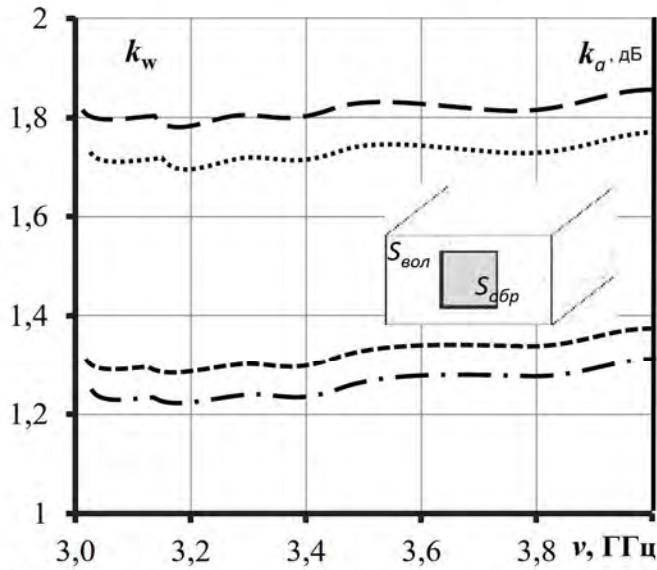


Рис. 1. Коэффициенты стоячей волны и ослабления.

Измерения проводились с использованием рупорных антенн в схемах с векторным анализатором P4226 или сборных схемах (генератор, измеритель мощности, ...).

Исследование динамики разрушающих воздействий мощных электромагнитных волн на наноструктурированные среды производилось в волноводном тракте на частоте 2,45 ГГц генерируемых магнетроном M105-1 с мощностью 650 Вт, Рис. 2. Учитывался поляризационный фактор, взаимная ориентация волны H_{10} и образцов. Для анализа воздействия импульсных полей были задействованы пирометр «Center 350», интерференционный, атомносиловой и электронный микроскопы.

Для измерений дифракционных явлений в терагерцовом диапазоне использовались открытые и закрытые линейные сборки. Сборные системы строились на основе головок, серийно выпускаемых монохроматоров (МДР-4, МДР-41, ДМР-4, ...), с дополнительной обвязкой и изменяемой оптической схемой на специализированных столах с усиленными источниками излучения (газовые разрядные лампы, гелий-неоновый лазер, ...). Заводские системы, представляли собой нормированные и фиксированные оптические схемы, позволяющие достаточно быстро и точно получать рабочие спектры в цифровом виде (Cintra 4040, СФ-56, ...).

Относительные мощности отраженной, прошедшей и поглощенной волн, в долях падающей волны (оптические коэффициенты k_R , k_T , k_L) пересчитывались через k_w и k_a или S_{11} и S_{21} при соотношении для баланса мощностей. Для достоверности результатов измерений волноводным методом соблюдалось требование к соотношению площадей образца и поперечного сечения волновода: $S_{обр} \leq 0,1 S_{вол}$, Рис. 1 вкладка. Абсолютные значения величин, характеризующие дифракционные

процессы в свободном пространстве, измерялись с использованием рупорных

антенн в схемах с векторным анализатором P4226 или сборных схемах (генератор, измеритель мощности, ...).

Исследование динамики разрушающих воздействий мощных электромагнитных волн на наноструктурированные среды производилось в волноводном тракте на частоте 2,45 ГГц генерируемых магнетроном M105-1 с мощностью 650 Вт, Рис. 2. Учитывался поляризационный фактор, взаимная ориентация волны H_{10} и образцов. Для анализа воздействия импульсных полей были задействованы пирометр «Center 350», интерференционный, атомносиловой и электронный микроскопы.

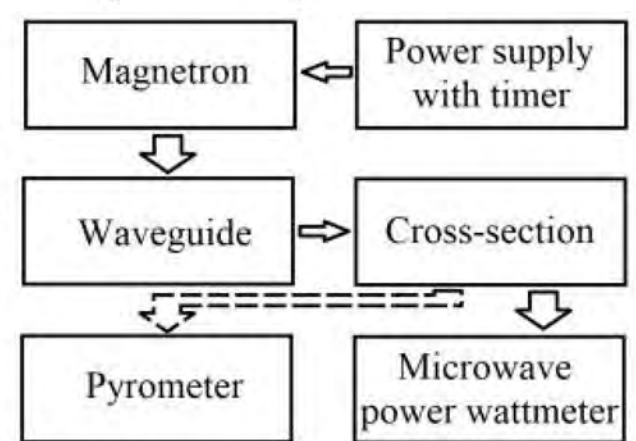


Рис. 2. Блок схема установки для воздействия ЭМП на ИМС.

фиксированные оптические схемы, позволяющие достаточно быстро и точно получать рабочие спектры в цифровом виде (Cintra 4040, СФ-56, ...).

Третья глава содержит результаты экспериментов и анализ взаимодействия электромагнитных волн гигагерцового диапазона с проводящими, диэлектрическими и полупроводниковыми образцами, содержащими наноразмерные среды, которые позволяют устанавливать связь дифракционных полей с физическими

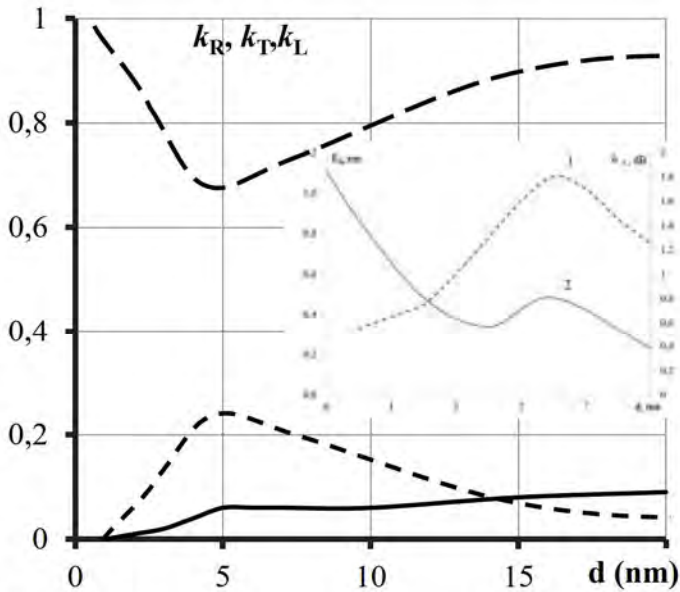


Рис. 3. Коэффициенты отражения, прошедшей и поглощенной волн от толщины проводящих наноструктур.

Максимальное поглощение обусловлено электродинамическими свойствами объекта, которые определяются проводимостью, являющейся функцией наноразмерности структуры.

При волноводных исследованиях размеры образцов не превышали 0,1 размеров поперечного волновода. При соблюдении этих требований за объект проходит 0,7...0,8 мощности падающей волны, тем не менее при $d = 2...7$ нм поглощается более 20% мощности падающей волны (рис.3). Поглощение обусловлено переходом МДС от диэлектрика ($d \rightarrow 0$) к проводящей структуре, «закорачивающей» пространство при $d > 10...15$ нм. Процессы перехода в значительной мере обусловлены переходом структуры от совокупности рассеивающих центров (наночастиц) к достаточно однородной проводящей поверхности, Рис. 4. Из рисунка видно, что рассматриваемые среды неоднородны и наноструктурированы по 3D-

характеристиками структур, определяемые подложкой, материалом, технологией и т.д.

Основной особенностью, полученной при дифракции ЭМП на тонкоплёночных образцах, являлось сильное поглощение энергии воздействующей волны при толщинах пленок $d = 2...7$ нм. При таких толщинах доля поверхностного тока (скин эффект) в общий процесс преобразования энергии ЭМП составляет сотые доли процента. На Рис. 3 приведены зависимости относительных мощностей отраженной, прошедшей и поглощенной волн от толщины проводящих наноструктур.

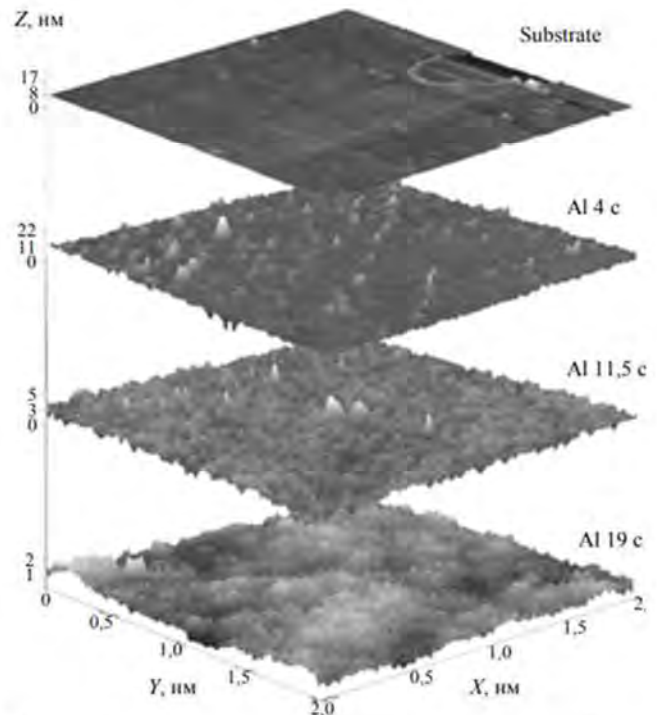


Рис. 4. Динамика изменения рельефа МДС при увеличении времени напыления.

направлениям, что приводит к особенностям формирования поверхности металлизированных структур по мере увеличения толщины пленок. Морфологии поверхностей структур на твердых и полимерных подложках отличаются друг от друга. Были задействованы как твёрдые (ситаллы, стекла, ...), так и гибкие (полимерные) основания (лавсаны, фторопласты, ...).

При этом, электродинамические свойства металлизированных сред (МС), осажденных на подложки из боросиликатного стекла и ситалла практически одинаковы, что в первую очередь обусловлено идентичностью геометрий их поверхностей.

Сравнения оптических коэффициентов металлизированных сред показали смещение максимума поглощения для металлизации, осажденной на гибкие лавсановые подложки, в сторону больших толщин, 7-8 нм, в сравнении с проводящей средой, выращенной на подложках из ситалла, Рис. 5.

Стоит отметить, что пленки меди, полученные ионным (магнетронным) методом, на всех толщинах, показали большие значения коэффициентов стоячей волны, Рис. 6 (пунктирные линии – пятинанометровые) и ослабления, чем остальные исследуемые материалы. Наименьшие значения k_a и k_w имели пленки титана. Изменения дифракционной зависимости при взаимодействии со средами полученными различными методами, показало, что для пленок меди, алюминия и других материалов, толщиной менее 10 нм, напылённых магнетронным методом, коэффициент ослабления больше чем у пленок, полученных ионным методом.

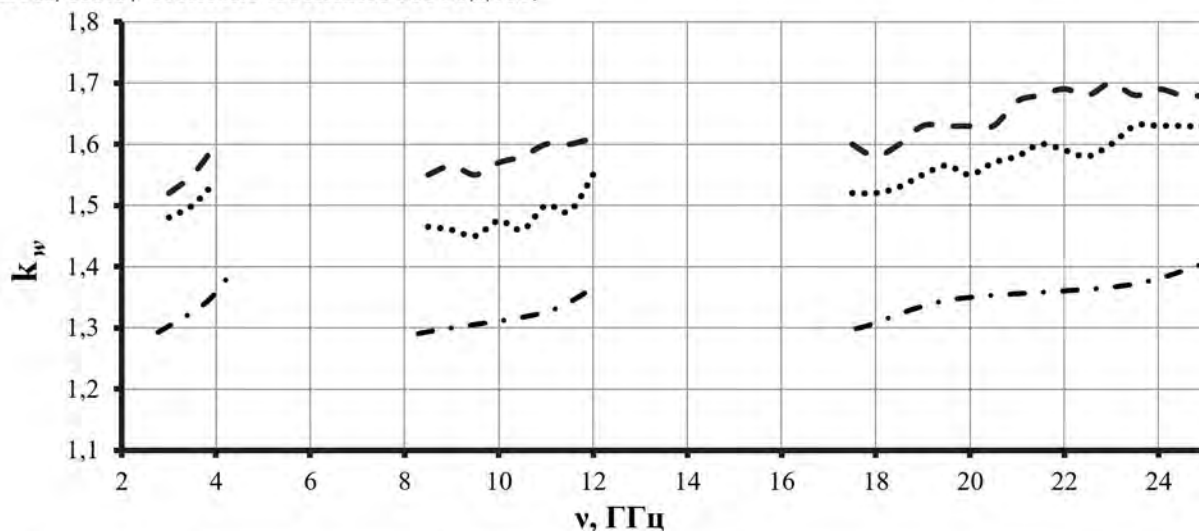


Рис. 6. Сравнение коэффициентов стоячей волны для меди (пунктирные линии), алюминия (точки) и титана (точка – тире), полученные на трех волноводных измерительных системах (P2-56, P2-61 и P2-66).

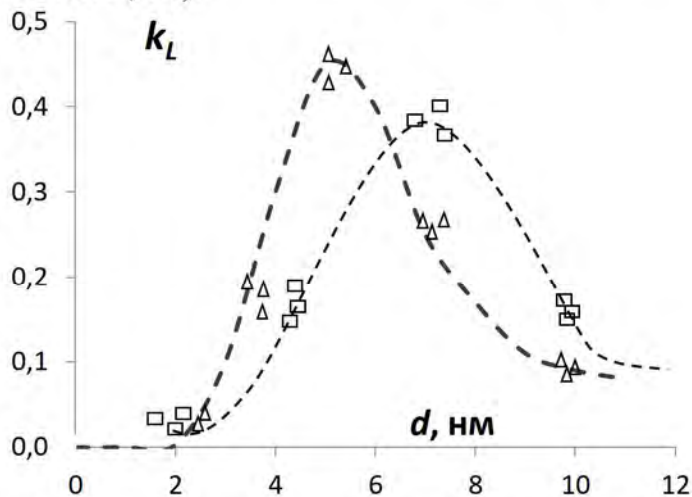


Рис. 5. Усредненные зависимости коэффициента поглощения k_L , полученные на панорамном измерителе P4226 на ситалловых (Δ) и лавсановых (\square) подложках.

При взаимодействии СВЧ излучения с полупроводниковыми средами (Si, C), особо стоит выделить углеродные модификации (ФСМ, C₆₀, C₇₀), пленки которых имели коэффициенты ослабления, аналогичные кремниевым на частоте 3 – 4,2 ГГц, Рис. 7 а. С увеличением частоты взаимодействующей волны коэффициент ослабления среды, сформированной из наноструктурированной фазы, заметно возрастал, и на частотах от 8,5 до 11,5 ГГц для фуллерена C₆₀ и смеси с C₇₀ составил 0,8 дБ, что более чем в 5 раз выше значений низкочастотного поддиапазона измерений, Рис. 7 б. Для ФСМ ослабление осталось на прежнем уровне.

Дифракционные измерения, в частотном диапазоне $\Delta\nu = 17,82 - 24,48$ ГГц, показали еще большее увеличение измеряемого параметра как внутри данного диапазона, так и по сравнению с предыдущими диапазонами. Для фуллерена C₆₀ и композита C₆₀+C₇₀ наблюдается прирост увеличения ослабления с возрастанием частоты. Так, на частоте $\nu = 17,82$ ГГц для C₆₀ $k_a = -1,4$ дБ, а для смеси C₆₀+C₇₀ $k_a = -1,35$ дБ. На частоте $\nu = 24,48$ ГГц для C₆₀ $k_a = -1,9$ дБ, а для композита C₆₀+C₇₀ $k_a = -1,8$ дБ.

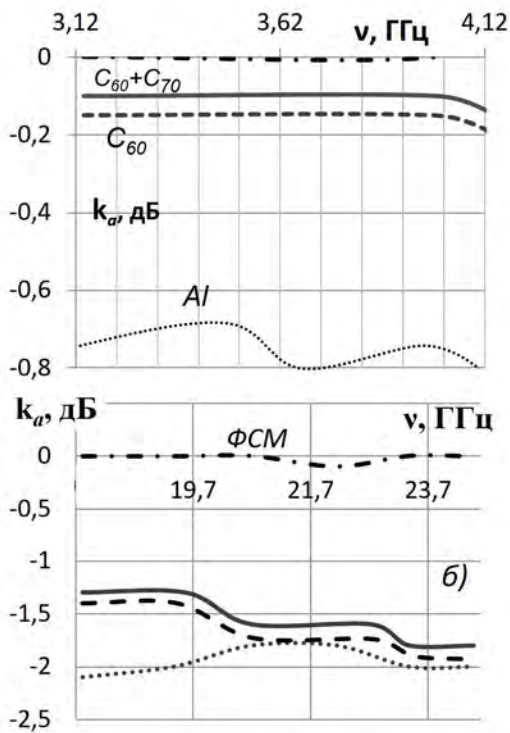


Рис. 7. Сравнительная частотная зависимость коэффициентов ослабления углеродных модификаций.

Большие коэффициенты пропускания электромагнитной волны органических пленок, модернизированных изатин- β -анилов, на промежутке от 19 до 24 ГГц, объясняются тем, что фронт падающей волны не идеально плоский, а комбинация изатин- β -анил C₁₄H₁₀N₂O и группы NH - фенилгидразон изатина, совместно со стеклянной подложкой, образует фокусирующую линзу. Зависимости коэффициента пропускания показали, что производные исходной составляющей органического вещества могут количественно менять дифракционные характеристики. Так, на частоте 24 ГГц коэффициент k_T у IBA уменьшается практически до девяноста пяти процентов. Этот же материал показывает и минимальное ослабление, при пропускании 97 % падающей мощности, на частоте 19,5 ГГц. Наибольшее ослабление из всей серии синтезированных материалов зафиксировано у органической структуры РНВИ, которая имела коэффициент пропускания $k_T = 89\%$ на частоте в 23,4 ГГц.

При воздействии мощных электромагнитных полей на наноразмерные проводящие среды дифракция имела нелинейный характер, т.к. превышение пороговой мощности падающей волны приводило к деградации структуры и меняла соотношение между волнами. Как пример пробой и тепловые явления в металлизированных пленках на частоте 2,45 ГГц при мощности СВЧ-излучения 650 Вт приводит к нелинейному разогреву, Рис. 8.

При анализе пробойных явлений было установлено, что разрушение проводящей структуры развивается за счет действия силы Лоренца по пути наибольшего градиента плотности тока, т.е. по середине МДС перпендикулярно

вектору напряженности электромагнитного поля падающей волны, Рис. 9, тогда как при воздействии постоянного и переменного ВЧ напряжения пробой развивался в основном в местах контакта, где была максимальная неоднородность электрофизических параметров.

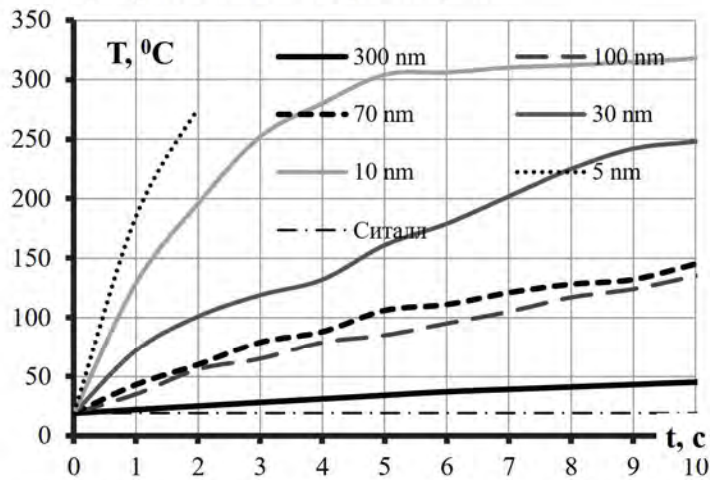


Рис. 8. Зависимость температуры МДС от времени воздействия СВЧ-излучения для различных толщин металлизации.

волноводе и свободном пространстве отличаются не более 10 %. Такая корреляция результатов позволяет проводить исследования по рассеиванию, дифракции и трансформации электромагнитных волн базируясь на волноводных методах.

Четвертая глава – включены результаты экспериментальных исследований взаимодействия электромагнитных волн терагерцового диапазона с проводящими и полупроводниковыми структурами.

Были получены дифракционные характеристики при падении оптического излучения на металлизированные среды с толщинами 1-10 нм. Для больших толщин коэффициент отражения $k_R \sim 100\%$ не рассматривался. Установлено нелинейное падение коэффициента пропускания с 70 до 50 % при достижении толщины проводящей среды 5 нм, Рис. 10. Аналогичный скачок, с 25 до 50 %, в среднем, наблюдался и для коэффициента отражения. К тому же, уменьшение разброса относительно среднего, как в спектрах отражения, так и в спектрах пропускания, наблюдался для сред с толщинами больше 5 нм. Сводя воедино зависимости коэффициентов отражения, пропускания оптического диапазона, Рис. 10, нелинейное поглощение СВЧ излучения, Рис. 3 и атомно-силовую микроскопию, Рис. 4, сделан вывод о нелинейной природе трансформации электромагнитных волн в металлизированной среде, имеющей наноразмерную метрику, в широкой полосе частот.

Рассмотрение преобразования оптических волн в полупроводниковых средах опиралось на экспериментальную серию, в которой пленки аморфного кремния осаждались методами ионного и магнетронного распыления. Показано, что

Волноводные методы позволяют качественно, а при определенных условиях, количественно исследовать характеристики объектов с наноразмерными структурами. Абсолютные значения дифракционных характеристик можно определить лишь в свободном пространстве с соблюдением всех требований к проведению подобных исследований. Проведенные в работе исследования показали, что результаты измерений дифракционных характеристик в



Рис. 9. Пробойные треки проводящей среды.

увеличение доли водорода в аргонородной плазме до 30 %, позволяет получать структуры, имеющие коэффициент поглощения порядка 300 см^{-1} на частоте 480 ТГц,

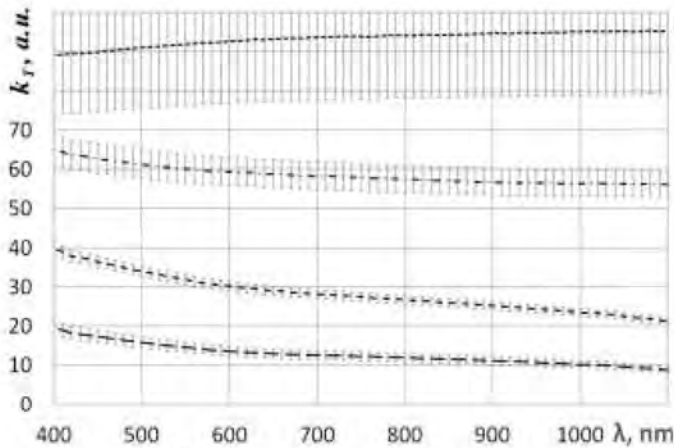


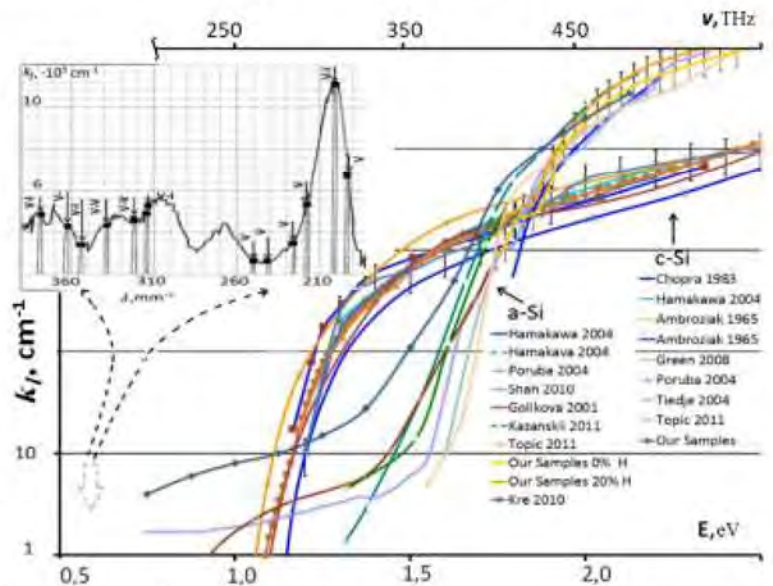
Рис. 10. Терагерцовый спектр пропускания алюминиевых плёнок с толщинами: 1 нм (\cdot), 3 нм ($- \cdot$), 5 нм ($-$), 7 нм ($-$).

что практически в десять раз меньше, чем у негидрированного кремния. Хотя с увеличением частоты падающего излучения, в области выше 580 ТГц, эта разница уменьшается, 35000 см^{-1} против 50000 см^{-1} . Увеличение концентрации H_2 до предельных 50% в рабочем объеме позволило получить пленку с коэффициентом поглощения 1200 см^{-1} на 480 ТГц и 5500 см^{-1} на частоте 600 ТГц.

В сравнении с результатами ведущих научных групп показано, что смещением фундаментальной полосы поглощения возможно управлять посредством уменьшения дефектных

колебательных центров, образованных неидеальностями кристаллической решетки. При этом смещение края полосы с 270 ТГц (1 мкм), для упорядоченной среды, до 430 – 480 ТГц (0,65 – 0,7 мкм), для аморфной фазы, возможно уменьшить до 360 ТГц (0,85 мкм), Рис. 11.

Далее были исследованы дифракционные свойства некристаллических сред полученных на основе наноструктурированного кремния и фуллерена. Рассмотрено взаимодействие оптических ЭМ волн с пленками, осажденными из взвесей кремния и углерода, а также их композитов. Было установлено, что использование различных типов растворителей значительным образом влияло на морфологию поверхности. Это, в свою очередь, обеспечивало разнообразную геометрию поверхности пленок, которая влияла на оптические спектры падающей электромагнитной волны



Особо выделены максимумы поглощения у C_{60} , осажденного с использованием толуола в качестве растворителя, 0,27 у.е. Пик поглощения наблюдается, в диапазоне длин волн 330 – 500

Рис. 11. Сравнение коэффициентов поглощения кристаллических и некристаллических сред на примере кремния. На вкладке низкочастотная часть спектра поглощения с соответствующими центрами.

нм. Дальнейшее увеличение длины волны сопровождается спадом кривой вплоть до ближнего ИК диапазона. Данная тенденция характерна для всех вариаций пленок C_{60} ,

исследованных в данной работе. Следующей по величине поглощающих свойств идет пленка фуллерена, осажденная с использованием дихлорметана в качестве растворителя, 0,175 у.е. Спектры поглощения вариаций фуллерена, осажденных с использованием

бензола, хлороформа и тетрахлорметана практически идентичны друг другу. Так, максимум поглощения для бензола - 0,14 у.е., для хлороформа - 0,12 у.е. и тетрахлорметана - 0,125 у.е. Таким образом, в работе показано, что использование различных растворителей позволяет управлять самоорганизацией физико-химических неравновесных систем и строить высокоэффективные приемники излучения

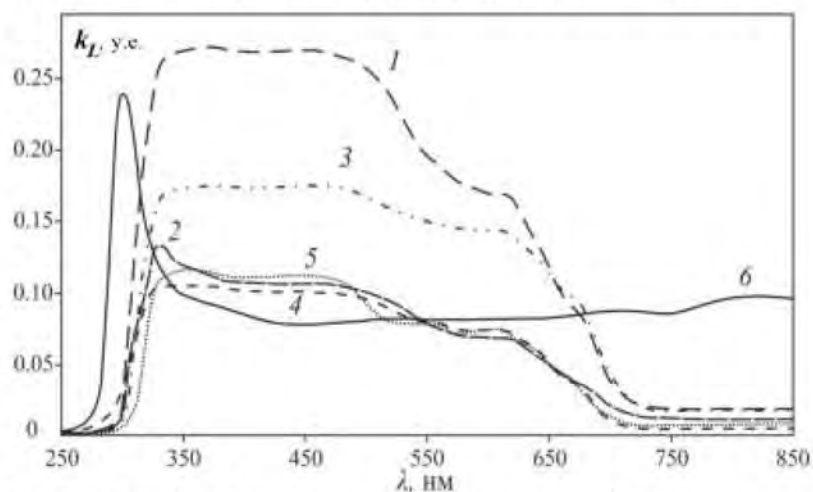


Рис. 12. Коэффициент поглощения фуллерена из растворителя: 1) толуол, 2) бензол, 3) дихлорметан, 4) хлороформ, 5) тетрахлорметан, 6) подложка.

оптического диапазона с энергиями поглощения: C_{60} в $C_6H_5CH_3$ – 1,74 эВ; C_{60} в C_6H_6 – 1,85 эВ; C_{60} в CH_2Cl_2 – 1,77 эВ; C_{60} в $CHCl_3$ – 1,89 эВ; C_{60} в CCl_4 – 1,91 эВ.

Продолжением поиска радиофизических закономерностей взаимодействия и трансформации ЭМ волн в неоднородных средах было рассмотрение поглощающих и переизлучающих свойств органических материалов. Исследование трансформации спектра органическими материалами проводилось при максимумах возбуждения, которые соответствовали ближнему ультрафиолетовому спектральному диапазону:

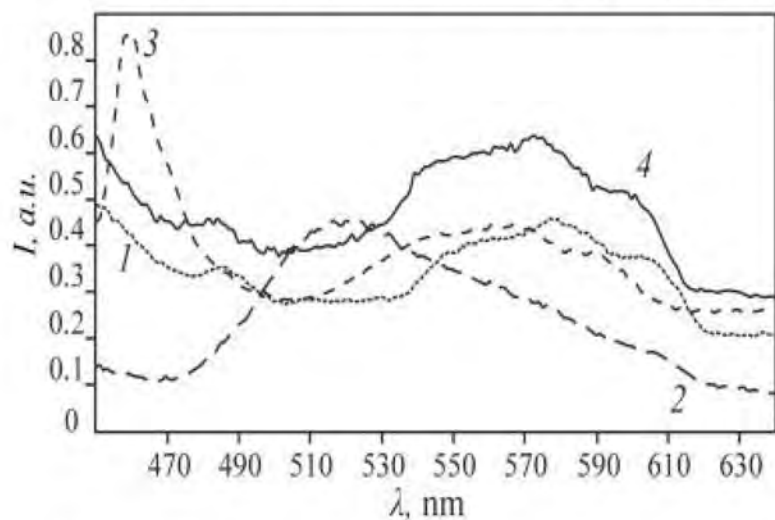


Рис. 13. Спектры люминесценции пленок изатинов: 1- $I\beta A$, 2- PHI , 3- $PHVI$, 4- $PHFI$.

490–540 нм. Допирование фенилгидразон изатина атомами брома, Рис. 13. кривая 3, и фтора, Рис. 13. кривая 4, возвращают первоначальную форму спектров люминесценции, а также смещают длинноволновый пик обратно на ~ 580 нм, с максимальным значением у $PHFI$ плёнок.

$I\beta A$ – 365 нм, PHI – 360 нм, $PHVI$ – 350 нм, $PHFI$ – 360 нм, тогда как экстремумы люминесценции лежали в диапазоне 450–610 нм, Рис. 13.

Переизлучения $I\beta A$, Рис. 13. , кривая 1, можно охарактеризовать двумя максимумами: первый, относительно узкий пик в синезеленом диапазоне 475–485 нм, и второй, более широкий, в длинноволновой части 520–600 нм. Пленка PHI , Рис. 13. кривая 2 имела пик, смещенный в синезеленую спектральную область

490–540 нм. Допирование фенилгидразон изатина атомами брома, Рис. 13. кривая 3, и фтора, Рис. 13. кривая 4, возвращают первоначальную форму спектров люминесценции, а также смещают длинноволновый пик обратно на ~ 580 нм, с максимальным значением у $PHFI$ плёнок.

Далее, был проведен анализ оптических спектров при взаимодействии электромагнитных волн терагерцового диапазона с органическими структурами на основе гидразонов. Было установлено, что пленки Hydrazone характеризуются наличием коротковолнового пика в сине-зеленом диапазоне. IMPH отличается появлением пика поглощения в диапазоне 440-460 нм. У органических пленок PNH1, аналогично с Hydrazone, наблюдается появление узкополосного коротковолнового пика в сине-зеленом диапазоне. Кривые поглощения, в свою очередь, характеризуются двумя максимумами: на отрезке длин волн 250–350 нм и 350–450 нм. Общей тенденцией при усложнении молекулярной единицы от IβA до PNH1 является увеличение интенсивности пиков поглощения, приходящее к смещению края фундаментального поглощения и изменению ширины запрещенной зоны: 2.4 eV для Hydrazone; 3.05 для IMPH; 2.42 eV для IβA; 2.51 eV для PNH1; 2.32 eV для PNH1; 2.43 eV для PNH1.

Для анализа общих закономерностей поглощения и трансформации электромагнитных волн в многослойных средах были получены экспериментальные данные по взаимодействию излучения терагерцового диапазона на барьерных гетероструктурах. Основными сборками при этом являлись: Al-a-Si<H₂%> – c-Si – Al и Al – C_{xx} – Organic – ITO.

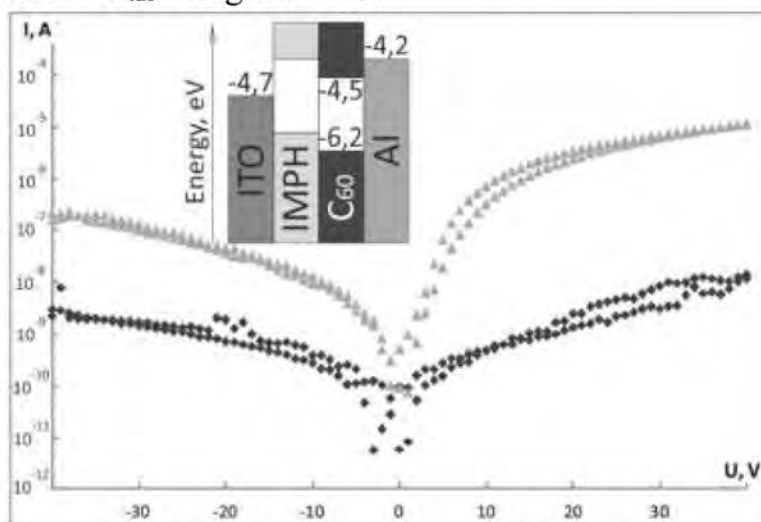


Рис. 14. Темновые (♦) и световые (▲) вольт-амперные характеристики гетероструктуры C₆₀-IMPH.

Полученные световые вольтамперные характеристики для кремниевых структур показали влияние типов базовых подложек. Режимы напыления пленок аморфного кремния также влияли на вольтамперные характеристики получаемых образцов. Совокупность данных двух факторов привела к формированию как переходов, обладающих выпрямляющими свойствами, так и контактов, близких к омическим. Воздействие электромагнитного излучения оптического диапазона на гетероструктуру Al-C₆₀-IMPH-ITO привело к увеличению силы тока при прямом напряжении на три порядка: значения обратных токов составили 240 nA, а прямых — 12 μA при равных напряжениях, Рис. 14. Таким образом, добавление 4-метилфенилгидразона N-изоамилизатина в систему Al-C₆₀-ITO позволило увеличить несимметричность темновых ВАХ практически в 2 раза. Фотоэлектрические характеристики подобных структур показали увеличение прямых токов на три порядка, что на два порядка выше возрастания токов пленок на основе лишь C₆₀.

Отдельно исследовалось воздействие широкополосного излучения на гетероструктуры фуллерен (C₆₀) и 3-метил-1-фенил-4-формилпиразол-5-она (Hydrazone). Темновая вольтамперная характеристика симметрична и нелинейная, при напряжении 15 В токи не превышают 2,2 нА, тогда как при облучении исследуемой структуры характеристика несимметрична и токи достигают 57 нА.

Добавление гидразона позволило усилить оптоэлектронные свойства тонкопленочной структуры фуллерена C_{60} , возрастание силы тока под действием оптического излучения увеличилось с 5 до 29 раз.

Анализ преобразования волновой энергии ИК поддиапазона в проводящих средах базировался на длинах волн от 1 до 20 мкм. Характеристики взаимодействия с проводящей структурой, толщиной от 1 до 10 нм, практически совпали с частотными зависимостями подложек. Однако, особо стоит отметить значительные падения прохождения, до 40%, для толщин 7 нм, которые совпадают с аналогичными нелинейными изменениями спектров в высокочастотном и видимом диапазонах. При взаимодействии с некристаллическими полупроводниками (a-Si) особое внимание уделялось их изменению в зависимости от степени гидрирования среды. Увеличение концентрации водорода в аргоноводородной плазме до 30% при осаждении материала приводит к снижению коэффициента пропускания в среднем до 60%, а для a-Si:H, полученные при концентрации 40% коэффициент снижается до 50%. При более низких волновых числах, для всех трех сред, были выделены максимумы 1847 см^{-1} для аморфного и около 1920 см^{-1} для аморфного гидрогенизированного кремния, а также минимумов на 2032 см^{-1} и 2069 см^{-1} , соответственно.

При поиске радиофизических закономерностей трансформации ИК излучения при изменении наноструктурированной углеродной среды на основе C_{60} были рассмотрены пленки, полученные осаждением из пяти типов растворителей: толуола ($C_6H_5CH_3$), бензола (C_6H_6), дихлорметана (CH_2Cl_2), хлороформа ($CHCl_3$) и тетрахлорметана (CCl_4), при фиксированной массе исходного вещества 0,5 мг (или $0,15\text{ мг/см}^2$). При анализе спектров пропускания были выделены пики, соответствующие фуллерену, а также пики примесей, которые характерны высшим углеводородам. Наибольшее поглощение прослеживается у пленки фуллерена, осажденной с использованием хлороформа, с тремя полосами поглощения C и двумя C_{60} .

Исходя из того, что при взаимодействии электромагнитного излучения с материалами различной природы основную роль играет электронный спектр и энергетические уровни свободных и валентных электронов, поэтому в заключении был экспериментально рассмотрен электронный транспорт. В нелинейно убывающей зависимости проводимости наноразмерных металлических сред, были выделены участки с резким уменьшением и линейно убывающим сопротивлением, при увеличении толщины проводящего материала до 10 нм. Основной вектор исследований резистивных свойств тонкопленочных кремниевых сред был обусловлен изменениями взаимодействия электромагнитного излучения с пленками полученных при различном парциальном давлении водорода в камере при магнетронном распылении кремниевой мишени, который показал, что для большей эффективности преобразования лучистой энергии следует применять подложки на основе диэлектриков с шероховатостью поверхности 5 – 10 нм.

Значения удельного сопротивления для пленок, полученных из порошковых материалов варьировались: $0,022\text{--}12,2\text{ Ом}\cdot\text{см}$, нанокристаллического кремния; $0,012\text{--}0,015\text{ Ом}\cdot\text{см}$, плазменный FCM; $3\text{--}10\text{ Ом}\cdot\text{см}$, низкотемпературный FCM; $10^7\text{ Ом}\cdot\text{см}$, чистый C_{60} . Функциональные органические среды, Hydrazon и IMPH, не имеют светочувствительности, а при напряжении 5 В сила тока не превышает 710 нА. Проводящие свойства органических пленок IFA, PHH, PHVI, PHFI отличаются более высокой чувствительностью. Стационарная проводимость для исходного соединения

ИВА лежала в пределах $1,13 \cdot 10^{-7}$ S. Внедрение связи NH в структуру ИВА позволило увеличить проводимость до $3,02 \cdot 10^{-6}$ S. Для соединений РНВІ и РНFI добавление атомов Вг и F уменьшило проводящие свойства пленочных структур более чем на порядок и составило $3,59 \cdot 10^{-7}$ См и $6,35 \cdot 10^{-8}$ См соответственно. А наличие максимума низкочастотной проводимости говорит о прыжковом механизме переноса заряда в углеродосодержащих средах.

В пятой главе представлены численные модели различного уровня погружения в процессы преобразования энергии ЭМП в тепловую энергию среды, с наноразмерными объектами и, в отличие от экспериментальных методов позволяют моделировать свойства и физические явления в проводящих и полупроводниковых структурах по отдельности или при их произвольном сочетании.

Используемые в работе численные модели можно разделить на три группы: 1) характеристики проводящих структур и границ однородны; 2) модели, учитывающие неоднородность границ и проводящих сред; 3) модели, учитывающие квантовые процессы в наночастицах. В этих группах рассматриваются модели с различными подходами, позволяющие выявить влияние различных факторов на дифракционные характеристики.

Простейшая модель дифракции для однородной проводящей плоскости толщиной d использовала баланс мощностей и данные экспериментов (50% поглощенной мощности, $d = 5$ нм). Модель позволила найти минимальные значения усредненной удельной проводимости тонкопленочной среды σ , оценить поле в проводящем слое и скачок тангенциальной составляющей по обе стороны

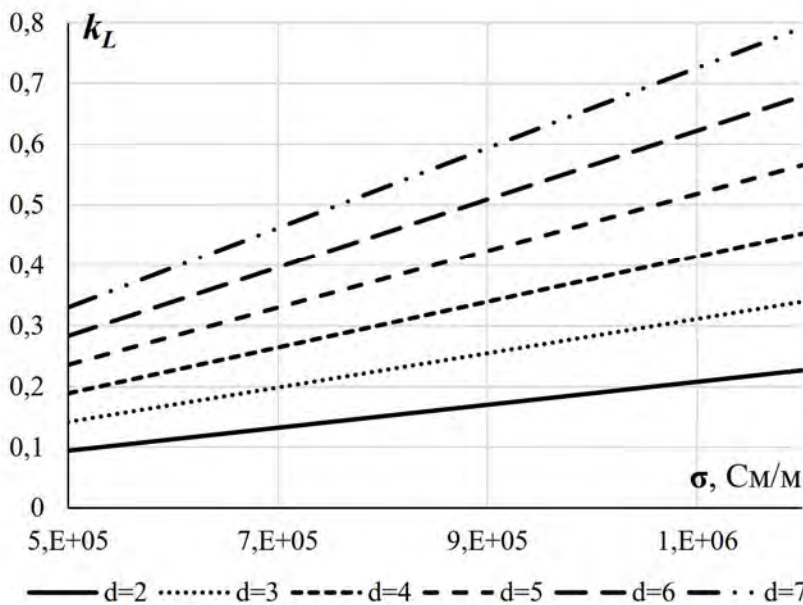


Рис. 15. Зависимость поглощения от удельной проводимости.

которой меняются от нм до нескольких длин волн. Это не единственный фактор, определяющий решение подобных задач. При $d < 10 - 15$ нм необходимо задавать зависимость удельной проводимости от толщины наноструктуры.

Для динамического анализа зависимости коэффициентов прохождения, пропускания и поглощения без привязки к мощности и напряженности при рассеивании плоской электромагнитной волны на плоскопараллельной проводящей

наноплоскости. На Рис. 15 приведены зависимости ослабления в зависимости от удельной проводимости среды ($E_s/E_0 = 0,5$, E_s – поле в среде, E_0 – поле на входе в наносреду).

Экспериментальные значения поглощения $k_L = 0,5$, $d = 5$ нм реализуются при удельной проводимости $\sigma > 10^6$ См/м.

Решение дифракционных задач для наноразмерных сред в волноводе сеточными методами ограничивается параметрами сетки, размеры

которой меняются от нм до нескольких длин волн. Это не единственный фактор, определяющий решение подобных задач. При $d < 10 - 15$ нм необходимо задавать зависимость удельной проводимости от толщины наноструктуры.

Для динамического анализа зависимости коэффициентов прохождения, пропускания и поглощения без привязки к мощности и напряженности при рассеивании плоской электромагнитной волны на плоскопараллельной проводящей

среде, имеющей нанометровую толщину, Рис. 16, использовалось приближение Френеля-Эйри:

$$r = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-j2\psi)}{1 + r_{12} r_{23} \exp(-j2\psi)} \quad \text{и} \quad t = \frac{(1 - r_{23})(1 - r_{12}) \exp(-j\psi)}{1 + r_{12} r_{23} \exp(-j2\psi)}, \quad (1)$$

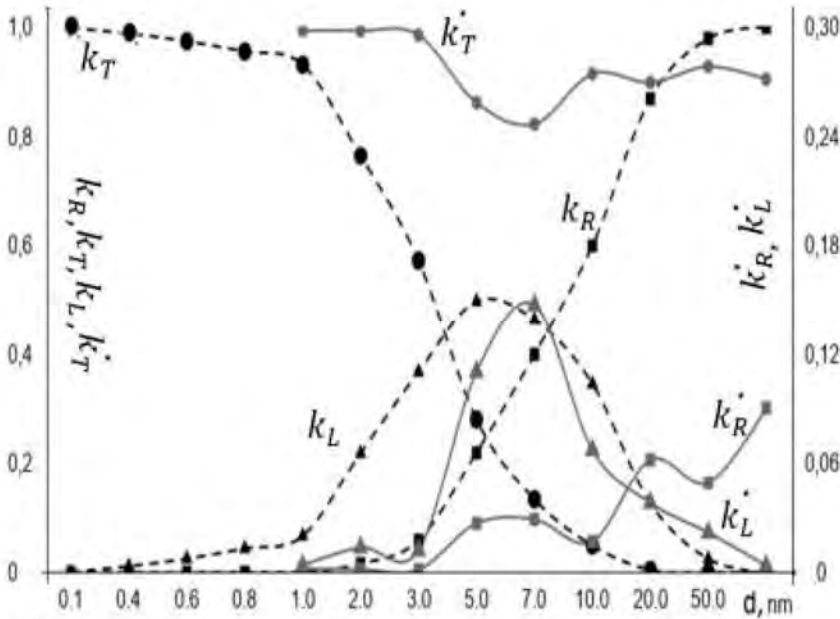


Рис. 16. Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей оптических коэффициентов: k_T, k_R, k_L - теоретические расчеты; k'_T, k'_R, k'_L - экспериментальные измерения.

в которых комплексные коэффициенты отражения r и прохождения t определяли оптические коэффициенты $k_R = |r|^2$, $k_T = |t|^2$ и $k_L = 1 - (|r|^2 + |t|^2)$, описывающие взаимодействие электромагнитной волны с проводящей средой. Показатель экспоненты линейно зависел от толщины проводящей плёнки d в свободном пространстве с волновым вектором k_0 , $\psi = k_0 \tilde{n} d$, с показателем преломления \tilde{n} , $\tilde{n} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$, в котором ϵ_r есть функция проводимости σ и частоты

падающего излучения ω : $\epsilon_r = -j\sigma/\omega\epsilon_0$.

Выражения зависимости удельной проводимости от толщины наноструктуры было получено аппроксимацией соответствующих экспериментальных зависимостей, которые достаточно сильно различаются в работах ряда авторов. Соответствующее выражение для удельной проводимости было получено представлением электронного транспорта движением носителей в однородной плазме, описываемое кинетическим уравнением Больцмана:

$$\frac{dg}{dt} = \vartheta \nabla_r g + \mathfrak{I} \nabla_q g + \frac{\partial g}{\partial t}. \quad (2)$$

Неравенство для функции распределения g решалось без учета силы Лоренца. Выражение для интеграла столкновений и перехода к удельной проводимости рассмотрены в диссертации. Полученное аналитическое выражение для удельной проводимости в зависимости от толщины среды d имеет вид:

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - \frac{1}{eD/d} \right), \quad (3)$$

где D – длина свободного пробега электрона, σ_0 – табличные значения проводимости. С учетом характеристик наноструктуры ($D < d$) и приближении (3) значения D необходимо подбирать для каждого материала. На Рис. 17 представлены экспериментальные и теоретические зависимости удельной проводимости от толщины наноструктуры. Соотношение (2) достаточно хорошо описывает поведение $\sigma = \sigma(d)$, как при малых, так и больших толщинах наноструктур и дало возможность

сопоставить экспериментальные данные коэффициентов k'_T , k'_R , k'_A (глава 3) с теоретическими k_T , k_R , k_L , Рис. 18.

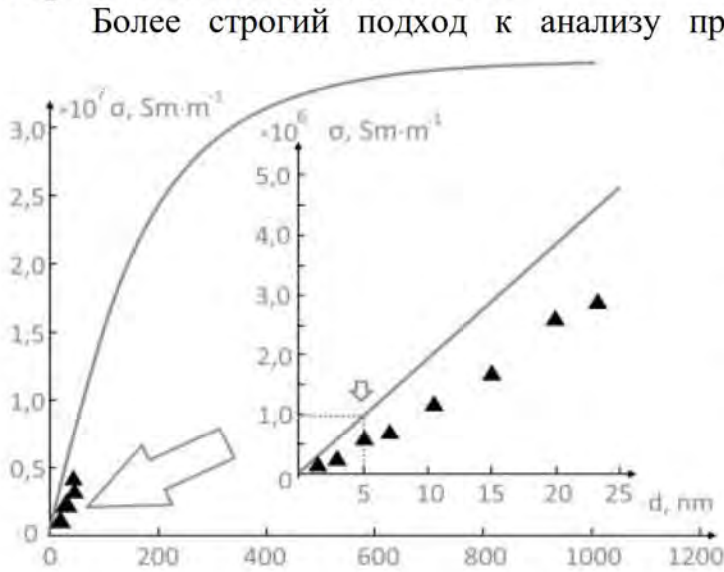


Рис. 17. Зависимости удельной проводимости от толщины среды: сплошная линия - расчетное значение по теоретической зависимости; \blacktriangle -эксперимент.

ближним взаимодействием и наличием точечной неоднородности потенциала. Решение для первой части E_c схоже с решением для кристаллической структуры, но с константами C и A , присущими рассматриваемой среде. Система уравнений для её дефектной составляющей E_{di} дала встроенные энергетические состояния в запрещённой зоне. Смещение по энергии ξ_j определяли детализацию выбранного локализованного центра в щели подвижности. Количественная оценка каждого типа дефекта задавалась коэффициентом b_j из предположения равномерности распределения его составляющих по объёму материала. Это, в свою очередь, дало возможность ввода псевдопериодичности дефектов и определения проводимости структуры как:

$$\sigma = e\mu_n \frac{(2\pi m^* kT)^{3/2}}{4\pi^3 h^3} A + \frac{e\mu'_n}{\alpha} \sum_{j=1}^Z b_j N'_c e^{-\frac{v_j \xi_j}{qkT}}, \quad (4)$$

где подвижность носителей μ_n и μ'_n , также как N_c и N'_c , детерминируется в зависимости от частей структуры, q – поправочный коэффициент.

Модель второй группы позволяет решать уравнения Максвелла с использованием метода связанных волн, в качестве сетки используется базис «пространство-частота», что значительно снижает порядок адаптации сетки в сравнении с базисом «пространство-время». Модель даёт возможность учесть неоднородность наноструктурированной среды и исследовать динамику её перехода от совокупности наночастиц к структуре со сплошной проводящей поверхностью. Двумерная функция диэлектрической проницаемости, Рис. 19 а, неоднородной среды, представляется дискретной сеткой высокого разрешения в пространственно-спектральной форме:

$$\varepsilon(k_x, k_y) = (1/N_x N_y) \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{k=1}^{N_y} \varepsilon(x_i, y_k) \exp(-j \cdot (k_x \cdot x_i + k_y \cdot y_k)), \quad (5)$$

где k_x, k_y – x и y компоненты волнового вектора, N_x, N_y – количество точек разбиения модельного пространства.

Более строгий подход к анализу природы проводимости неоднородной, некристаллической среды исходил из предположения слабого влияния локализованного дефекта на базовую кристаллическую решетку, т. е. практическое отсутствие изменения в периодичности основного периодического потенциала. Это дало возможность рассмотрения взаимодействия волновой функции электрона с периодическим и локальным операторами уравнения Шредингера.

Собственные энергии для данной системы также были разделены на две составные части. Первая часть для периодической системы, вторая — обусловлена

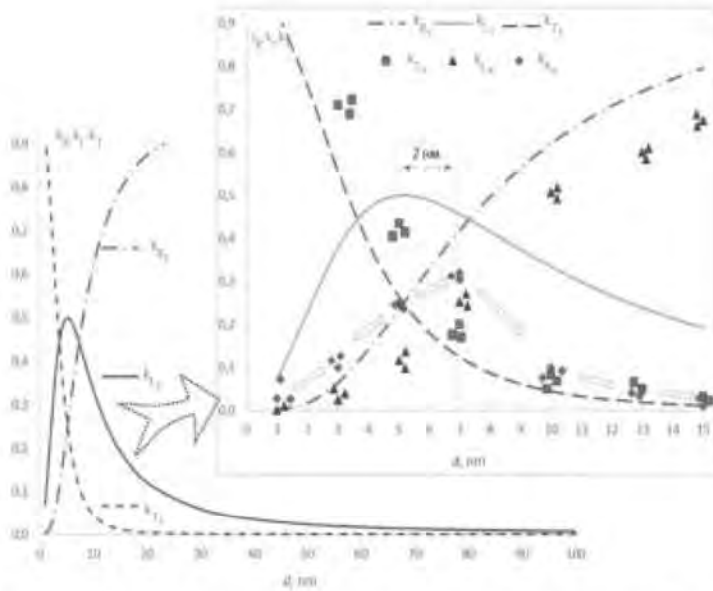


Рис. 18. Сопоставление экспериментальных значений и теоретических расчетов.

сравнивались с экспериментальными зависимостями в случае нормального падения высокочастотного излучения на поверхность. На Рис. 18. показаны зависимости оптических коэффициентов от толщины плёнки, рассчитанных для частот от 1 до 10 ГГц. При удельной проводимости порядка 10^6 См/м максимум поглощения достигается при толщине $d = 5$ нм, Рис. 18. В то время как при удельной проводимости для большинства проводников, имеющих кристаллическую структуру, более 10^7 См/м, этот максимум сдвигается в сторону меньших толщин практически на порядок.

В модели связанных волн в наночастицах, Рис. 19 а, проводимость предполагалась постоянной, не учитывалось конечное число электронов в наночастицах, что дает частотную независимость в широком частотном диапазоне, Рис. 19 б. Для проводящих частиц с диаметром 1...5 нм в гигагерцовом диапазоне частот $\Delta E \approx \hbar\omega/N_e$ становится соизмеримым kT и необходимо учитывать энергетический спектр электронов при воздействии ЭМП. С учетом квантования энергий носителей в наночастицах выражение для проводимости имеет вид:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_g/2kT), \quad (7)$$

где σ_0 – проводимость объёмного кристалла, $E_g = E_c - E_v$ – ширина запрещённой зоны (E_c – дно зоны проводимости, E_v – потолок валентной зоны), k – постоянная Больцмана и T – температура.

Значение запрещённой зоны, для данной зависимости, находилось из дисперсионного соотношения, получаемого из уравнения Шредингера, решаемого

Для процедуры сшивки и расчёта оптических коэффициентов используется метод S матриц. Оптические коэффициенты находились путём суммирования энергетических вкладов отражённых, прошедших и поглощенных волн:

$$k_T = \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q k_T(p, q), \quad k_R = \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q k_R(p, q), \quad (6)$$

где $k_T(p, q)$, $k_R(p, q)$ – коэффициенты гармоник (мод) соответствующих волн.

Теоретические модельные представления взаимодействия электромагнитного излучения с проводящими средами

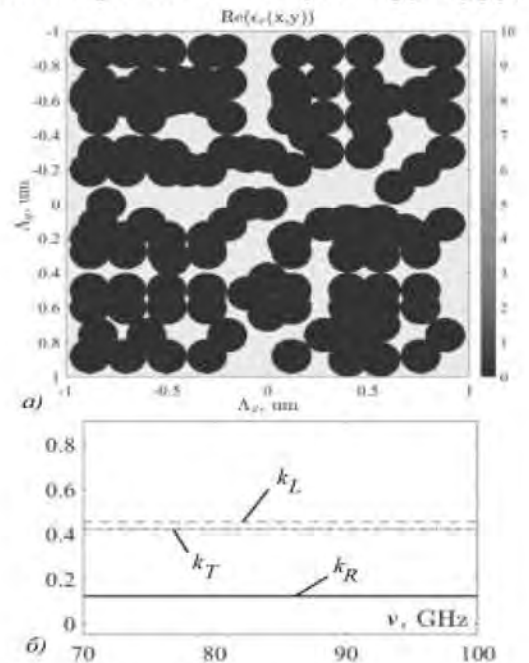


Рис. 19. Фрагмент формирования проводящих каналов а) модель структуры; б) оптические коэффициенты.

методом разложения по плоским волнам. В этом методе волновые функции электрона представлены в базисе плоских волн, а оператор Гамильтона имеет следующий вид:

$$\hat{H}_{p,q} = (\hbar^2/2m)(k_{x,y} - K_{p,q})^2 \delta_{K_p, K_q} + u(K_p - K_{p'}, K_q - K_{q'}), \quad (8)$$

где \hbar – постоянная планка, m – масса электрона, k – волновой вектор внутри первой зоны Бриллюэна $k_{x,y} = [-\pi/\Lambda_{x,y}, \pi/\Lambda_{x,y}]$ и $K_p = -(2\pi p/\Lambda_x)x$, $K_q = -(2\pi q/\Lambda_y)y$, p, q – номера пространственных гармоник $p = q = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, +\infty$, периоды решётки Λ_x и Λ_y вдоль соответствующих осей x и y . Функция потенциальной энергии определялась соотношением:

$$u(K_p, K_q) = \frac{1}{N_x \cdot N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} U(x_i, y_j) \exp(-j \cdot (K_q \cdot x_i + K_p \cdot y_j)), \quad (9)$$

где K_p, K_q – x и y компоненты волнового вектора, N_x, N_y – количество точек разбиения модельного пространства. $U(x_i, y_j)$ – двумерная функция потенциальной энергии.

По мере нарушения периодичности расположения потенциальных ям внутри элементарной ячейки, сплошная энергетическая зона $E_v \cup E_c$ разбивается на несколько подзон с образованием запрещённой зоны $E_g = 0.08$ eV, Рис. 20. Подставляя последнюю в (7) получали проводимость аморфного алюминия равную $\sigma = 1.8 \cdot 10^6$ S/m.

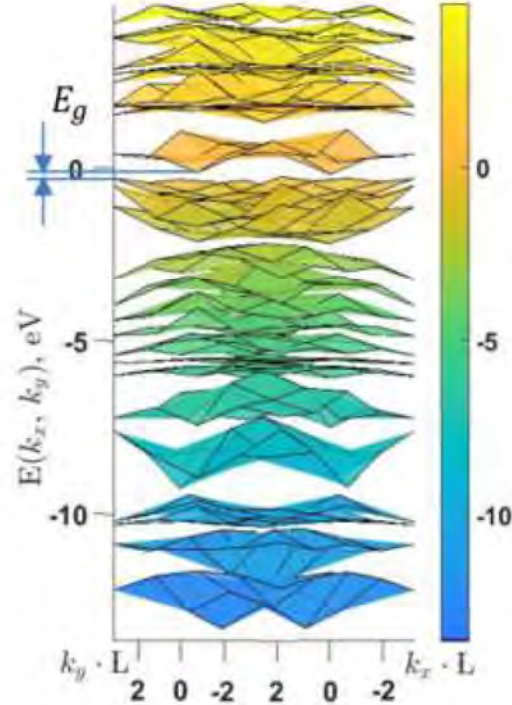


Рис. 20. Электронный спектр неоднородной проводящей среды.

Предельные взаимодействия электромагнитных волн с тонкими средами описывались физическими явлениями в тонких пленках с учетом временной динамики изменения резистивных потерь, нагрева металла и рассеивания тепла по подложке. При численных подходах, использующих параллельно методы автономных блоков и конечных разностей во временной области (FDTD), было показано, что под действием электрической составляющей падающей электромагнитной волны образуется градиент по току с максимумом на границах проводящей среды, который и приводит к тепловому пробую, глава 3.

В **шестой главе** рассматривается взаимодействие электромагнитных волн терагерцового диапазона с неоднородными, некристаллическими средами. Поглощение оптической волны в дефектной, разупорядоченной структуре материала представляется как поглощение на квазикристаллической и дефектной частях с суммарным коэффициентом k_l :

$$k_l = k_{ls} + k_{lh}. \quad (10)$$

Коэффициент поглощения k_{ls} отвечал за взаимодействие излучения с периодической частью решётки, а k_{lh} – описывал часть спектра связанных с неоднородностями.

Описав физику процесса взаимодействия посредством уравнения Шредингера с матричным элементом энергии возмущения:

$$\langle n_2, \zeta_2 | \hat{H}' | n_1, \zeta_1 \rangle = \int d^3 \chi \varphi_{n_2 \zeta_2}^* \hat{H}' \varphi_{n_1 \zeta_1} = X_{1,2} e^{\frac{i}{\hbar} [(\epsilon_{n_2}(\zeta_2) + \Delta\epsilon_{n_2}(\zeta_2)) - (\epsilon_{n_1}(\zeta_1) + \Delta\epsilon_{n_1}(\zeta_1)) - \hbar\omega] t}, \quad (11)$$

здесь $X_{1,2}$ — независимая от времени часть матричного элемента, коэффициента поглощения на переходах псевдозона - псевдозона неидеальной среды, на примере пленок кремния, был получен коэффициент поглощения на не прямых разрешенных переходах:

$$k_{ls} \approx k_{ls}^{\text{неп}} = \frac{C_{\text{исп}}}{\omega(\epsilon_0 - \hbar\omega)^2} (\hbar\omega - (\epsilon_g + \Delta\epsilon_g) - \hbar\omega_{KL})^2 \frac{C_{\text{полл}}}{\omega(\epsilon_0 - \hbar\omega)^2} (\hbar\omega - (\epsilon_g + \Delta\epsilon_g) + \hbar\omega_{KL})^2. \quad (12)$$

Сопоставление теоретических и практических спектров, которые также компилировались с результатами ведущих научно-исследовательских групп, показало большой разброс коэффициентов поглощений. Так для кристаллических структур девиации спектра лежали в пределах 10%, для поликристаллических разброс параметров достигает 20%, а для некристаллических сред разброс превышал 30%.

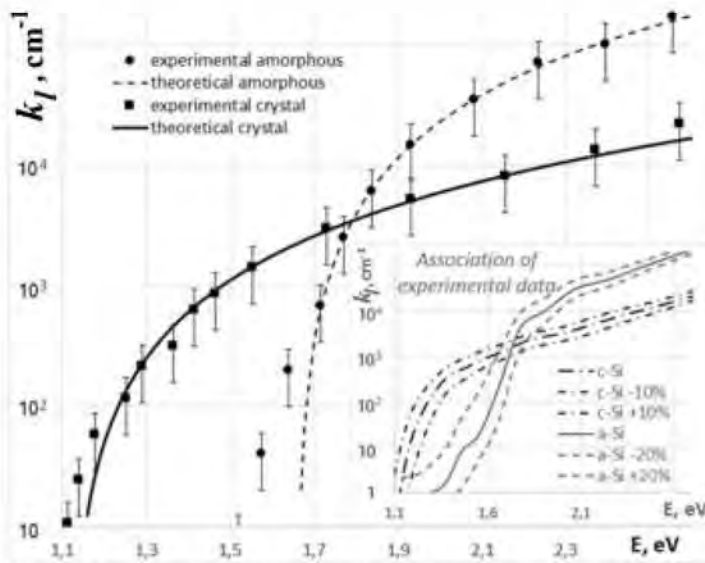


Рис. 21. Сравнение эксперимента и теории для коэффициента поглощения кремневого кристалла и его аморфной плёнок.

Описание взаимодействия электромагнитного излучения, имеющего микронные длины волн, задействуют детализацию электронного спектра в хвостах запрещенной зоны, в котором локализация отдельного дефекта описывалась псевдопериодичностью. В структуре материала тонких пленок, в частности кремния, имеются множество неоднородностей обусловленных неидеальностью роста на начальных стадиях. Такие дефекты как вакансии (V), межузельный атом (I), дивакансия (V-V) и так далее, образуют локализованные энергетические уровни. В случае воздействия внешних условий или целенаправленного легирования пленки сторонними атомами, в запрещенной зоне появляются дополнительные энергетические центры. В нашем случае, при гидрогенизации кремния атомами водорода, в запрещенной зоне появляются колебательные моды, образованные связями кремний-водород (Si-H): ножницы, растяжение связи, валентные и так далее.

Локализация каждой из подобной колебательной моды позволило представить их набором эйнштейновских двухуровневых поглощающих центров, с концентрациями $M_c = M_{cq}$ и $M_j = M_p$. В дипольном представлении, решая уравнение движения для отдельно взятого резонансного центра, с привязкой каждого типа резонаторов к середине ширины запрещенной зоны E_g , и воспользовавшись параметрами их

Использование

экспериментальных зависимостей, вставка Рис. 21., и модельных значений (12) объясняет изменение полосы фундаментального поглощения на $\Delta\epsilon_g = 0,4$ эВ. В этом модельном представлении используются константы $7700 \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-1}$ для кристалла α -Si и $2 \cdot 10^5 \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-1}$ для аморфного кремния, Рис. 21. В общем случае, интересным является качественное изменение оптической ширины запрещенной зоны. Поэтому константы C_j , независимые от частоты, в этом расчете подробно не рассматривались.

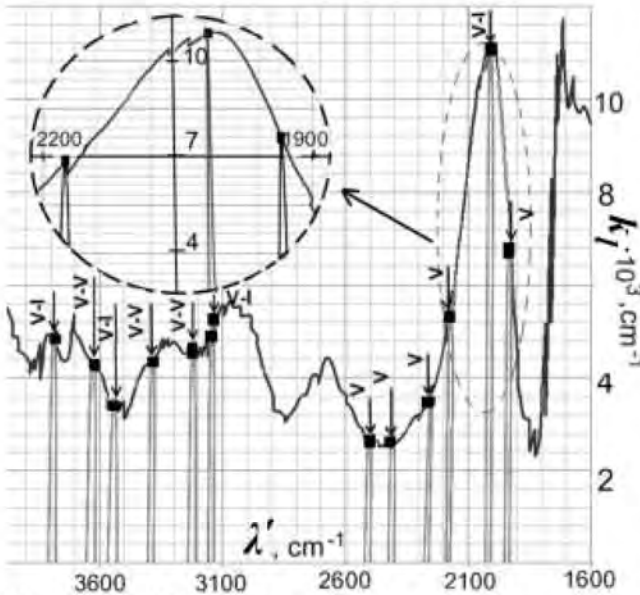


Рис. 22. ИК спектр поглощения пленок неоднородной полупроводниковой среды (кремний).

Подробное рассмотрение возможных интерпретаций поглощения, обусловленного собственными колебаниями дефектов и определения их связи с микроскопическими параметрами нелинейной среды, согласно приведенного выше равенству для $k_{lh}(v)$, осуществлялось подбором коэффициентов b_j и ζ_j на спектральных зависимостях, Рис. 22. Это позволило сопоставить пики поглощения на дефектах, получив подобным способом распределение дефектов в хвостах запрещенной зоны.

В случае образования резонансного колебательного центра, возникающего на связи собственных атомов с атомами примеси, в частотной зависимости коэффициента поглощения коэффициенты b_j и ζ_j характеризовали степень пассивирования. Например, для гидrogenизированных пленок кремния, осажденного в плазме водорода (парциальные давления: 1 – 0%; 2 – 30%; 3 – 40%, с центрами колебательных мод Si-H, Рис. 23, в частотном диапазоне от 1700 до 2600 cm^{-1} . Используя выбранные параметры, интерпретировано изменение спектра в зависимости от концентрации водорода в пленках кремния, глава 4.

В завершение рассмотрена специфика построения потенциальных барьеров, преобразующих электромагнитное излучение. Базируясь на процессах формирования приповерхностного перехода, дана оценка возможности построения преобразующих структур на основе пленок, имеющих неидеальную

численной b_j и энергетической ζ_j оценкой, коэффициент поглощения представлялся как:

$$k_{lh}(v) = \sum_{j=1}^K \frac{4\pi q^2 M_c b_j w^2 \zeta_j}{c m \left[\left(\left(\frac{E_g}{2\hbar} - \frac{\xi_j}{\hbar} \right)^2 - w^2 \right)^2 + w^2 \zeta_j^2 \right]}$$

Экспериментальные спектры пленок кремния в диапазоне волновых чисел 1600-3900 cm^{-1} , Рис. 22, были описаны суммой коэффициентов поглощения на соответствующих длинах волн (указаны в скобках в микрометрах):

$$k_{lh}(v) = \sum_{j=1}^K k_{lh_j}(v) = k_{lh_1}(2,6) + k_{lh_2}(2,76) + k_{lh_5}(3,1) + k_{lh_6}(3,18) + k_{lh_7}(4,0) + k_{lh_8}(4,1) + k_{lh_{11}}(4,96) + k_{lh_{12}}(5,17).$$

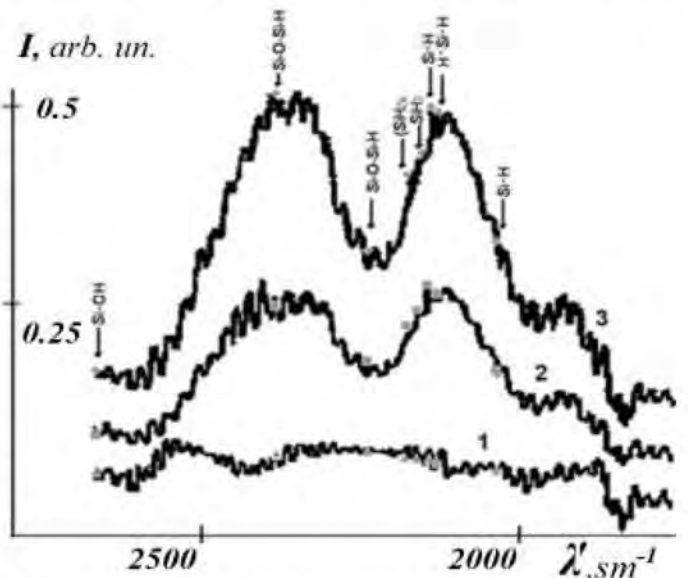


Рис. 23. Теоретическая интерпретация колебательных мод неоднородной среды.

кристаллическую решетку. Профиль на глубине 300 – 500 нанометров строился для оптоэлектронных преобразователей, со средним коэффициентом полезного действия 16 %. Нарушение периодичности решетки и наличие дефектов влияют на значения предельного коэффициента диффузии k_d^∞ , энергию активации Ea и предельную растворимость примеси M на основе, которой рассчитываются профили диффузии. Показано, что наиболее значительным параметром, влияющим на построение профиля встроенного заряда, преобразующего падающую электромагнитную волну, является энергия активации. Так, на примере низкотемпературной диффузии фосфора в кремний, изначально легированного бором $10^{15} \frac{1}{\text{см}^3}$, неточность задания Ea может привести к смещению перехода на 170 нм.

Заключение и основные выводы

Таким образом, на основе анализа экспериментальных данных большого объема автором установлены основные закономерности взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного, инфракрасного и видимого диапазонов с наноструктурированными искусственными средами, сформированными на основе металлизированных, кремниевых, углеродных и органических материалов, и выявлены физические механизмы преобразования волновой энергии в неоднородных и нелинейных, проводящих и полупроводниковых структурах.

Представленная в диссертационной работе совокупность экспериментальных и теоретических исследований проблем взаимодействия электромагнитных волн СВЧ и оптического диапазонов с наноразмерными и наноструктурированными проводящими и полупроводниковыми средами, позволяет сформулировать общие выводы:

1. Спектры взаимодействия электромагнитного гигагерцового излучения с тонкими металлическими пленками практически не зависят от частоты падающего излучения. Частотные зависимости оптических коэффициентов обусловлены особенностями атомного строения наноразмерных проводящих структур, морфологией поверхности и структурой подложки.
2. Максимум поглощения электромагнитных волн СВЧ диапазона сверхтонкими пленками достигает 50% от падающей мощности на толщинах 5 – 7 нм, в зависимости от типа проводящего материала, структуры и геометрии поверхности подложки. Полученные спектральные зависимости тонких и сверхтонких пленок, в совокупности с их размещением в волноводных трактах, можно использовать для создания согласованных нагрузок, аттенюаторов и фильтров в СВЧ схемотехнике.
3. Установлены два механизма влияния на предельные режимы эксплуатации радиоэлектронного оборудования при взаимодействии с СВЧ излучением: антенный механизм, при котором наводится разрушающий потенциал, создаваемый падающей электромагнитной волной и зависящий от степени поляризации излучения, и тепловой пробой в проводящих пленках, перпендикулярный электрической компоненте воздействующего поля, обусловленный высокочастотной природой излучения.

4. Край фундаментального поглощения наноразмерных пленок кремния изменяется от 0,6 до 1 мкм в зависимости от степени пассивации дефектов разупорядоченной кристаллической решетки.
5. Управление смещением края полосы поглощения пленок фуллеренов возможно посредством задействования различных типов растворителей, которые изменяя молекулярную стехиометрию нанометрической среды обеспечивают различные механизмы её самоорганизации.
6. Пики излучения в области 450 - 600 нм органических пленок на основе гидразона возможно получить путем модификации исходных 3-метил-1-фенил-4-формил-пирозол-5-она и 4-метилфенилгидразона N-изоамилизатина, не обладающих люминесцентными свойствами. При этом общая тенденция спектров прохождения через органические пленки, при усложнении молекулярной единицы, характеризуется увеличением интенсивности пиков поглощения.
7. Усиление оптоэлектронных свойств, до 30 раз, углеродных гетероструктур удалось достичь на основе барьеров фуллеренов с гидразонами. Получены максимальные значения световых ВАХ при взаимодействии широкополосного электромагнитного излучения видимого диапазона с гетероструктурами Al-C₆₀-IMPH-ITO, при котором прямые токи возрастали на три порядка в сравнение с темновыми.
8. Развита модельные расчеты, описывающие взаимодействие СВЧ излучения с пленками, имеющими неидеальную атомную структуру. Сопоставление напряженности полей и коэффициента поглощения с физическими параметрами пленок позволило определить значения удельной проводимости и толщины, при которых значение напряженности поля в них не превышает 50%.
9. На основе квантово-механического анализа взаимодействия электромагнитного излучения частотного диапазона 1-200 ГГц со сверхтонкими металлизированными средами показано, что при толщинах менее 10 нм нарушение симметрии кристаллической решетки проводника может привести к расщеплению электронного спектра и возникновению запрещенной зоны, влияющей на проводимость тонкой металлической пленки и её электродинамические характеристики.
10. Предлагаемая численно-аналитическая модель расчета встроенного потенциала демонстрирует зонную диаграмму и дает возможность прогнозировать построение тянущего барьера с переменной шириной запрещенной зоны для создания широкополосных преобразователей излучения.

Список основных печатных работ

1. Electromagnetic fields effect on metal-dielectric structures with nanometer conducting films/ Starostenko, V.V., Arsenichev, S.P., Grigorjev, E.V., Fitaev, I.S., Mazinov, A.S.//Conference Proceedings,Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW, 2021, 2. - s2.0 – 85114467152.
2. Current-voltage and spectral characteristics of heterostructures of fullerene-water system – N-isoamylisatin 4-methylphenylhydrazone/Mazinov, A.S., Gurchenko, V.S., Tytynik A.S. // Applied Physics– 2021.– 3.-P. 54 -59.

3. Effect of doping with N, Br, and F atoms on electrodynamic characteristics and physical properties of Isatin- β -anil/Gusev A. N., Mazinov A. S., Tyutyunik A. S., Fitaev I. Sh. et al. // *Technical Physics*, 2021, Vol. 66, No. 1, pp. 84–92.
4. A study of microwave radiation absorption in ultrathin conducting films / Starostenko V.V., Orlenson V.B., Mazinov A.S., Fitaev I.S.// *Technical Physics* – 2020. – V.65, № 8. – P. 1296–1300.
5. Nanostructured carbon and organic films: spectral microwave and optical characteristics/Starostenko V.V., Mazinov A.S., Tyutyunik A.S., Fitaev I.Sh., Gurchenko V.S., // *St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics* – 2020.– 13 (1), p. 106–117.
6. Quantum-Mechanical Approach to the Description of the Interaction between Microwave Radiation and Conducting Thin Films / Starostenko V.V., Orlenson V.B., Mazinov A.S., Akhramovich L.N. // *Technical Physics Letters* – 2020. – V.46, № 5. – P. 450 – 453.
7. Changes in the spectral and conducting properties of fullerene films depending on the type of solvent/Mazinov, A.S., Tyutyunik, A.S., Gurchenko, V.S.//*Applied Physics*– 2020. – (2), p. 64–70.
8. Absorbing and Conductive Properties of Thin Fullerene and Aluminum Films/Mazinov A.S., Tyutyunik A.S., Gurchenko V.S., Fitaev I.S., Vasilchenko V.M.//*International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, IEEE-2020*-p.47-50.DOI: 10.1109/APEDE48864.2020.9255600.
9. Взаимосвязь оптических коэффициентов сверхтонких металлических пленок и геометрических параметров морфологии их поверхностей / Мазинов А.С. // *Сибирский физический журнал*. 2020. Т. 15, № 2. P. 5–13. DOI 10.25205/2541-9447-2020-15-2-5-13.
10. Physical and electrodynamic properties of nanoscale conductive films on polymer substrates / Mazinov A.S. // *Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnye Tehnologii* – 2020–12(2), p. 247-252.
11. Forming surface dynamics of conductive aluminum films deposited on amorphous substrates / V. V. Starostenko, A. S. Mazinov, I. Sh. Fitaev, E. P. Taran,...// *Prikl. Fiz.* – No. 4, 60 (2019).
12. Взаимодействие электромагнитного излучения оптического и СВЧ диапазонов с органическими пленками изатинов. / Мазинов А.С.// *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2020. Т. 25. № 3. P. 29-36.
13. Effect of masses of active layers of C₆₀-4-methylphenylhydrazone N-isoamylisatin fullerene heterostructures on their rectifying characteristics / Mazinov, A.S., Tyutyunik, A.S., Gurchenko, V.S., Iina, V.Yu. // *Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnye Tehnologii* – 2020.–12(3), p. 361-368.
14. Research of heterojunctions based on the system of fullerene and hydrazone / Gusev, A.N., Mazinov, A.S., Shevchenko, A.I., (...), Braga, E.V. // *Applied Physics*–2019–6, p.48-53.
15. Breakdown features in functional devices of telecommunication systems / S.A. Zuev, A.S. Zuev, V.V. Starostenko, E.V. Grigoriev, A.S. Mazinov, E. P. Taran, I. Sh. Fitaev, V.

- B. Orlenson // 27th Telecommunications Forum, TELFOR – 2019. – 8971293. DOI: 10.1109/TELFOR48224.20.
16. Spectral and conductive properties of film heterostructures based on fullerene-containing material and 4-methylphenylhydrazone N-isoamilisatine / Gusev, A.N., Mazinov, A.S., Tyutyunik, A.S., Gurchenko, V.S. // Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnye Tehnologii – 2019. – 11(3), p. 331-336.
17. Surface topologies of thin aluminum films and absorbing properties of metal dielectric structures in the microwave range I. S. Fitaev, V. B. Orlenson, Y. V. Romanets, A. S. Mazinov / ITM Web of Conferences– 2019.– V. 30, 08013.
18. Structure and conductive properties of C₆₀ films and fullerene-containing materials deposited using aromatic and non-aromatic solvents. A.S. Mazinov, A.I. Shevchenko, A.S. Tyutyunik, V.S. Gurchenko, / ITM Web of Conferences– 2019.– V. 30, 08010.
19. The Voltage–Current Characteristics and Photoelectric Effect of Fullerene C₆₀–N-Isoamyliatin 4-Methylphenylhydrazone Heterostructures / Gusev, A.N., Mazinov, A.S., Shevchenko, A.I. et al. // Tech. Phys. Lett. (2019) 45: 997. – <https://doi.org/10.1134/S1063785019100080> – 2019/ –Technical Physics Letters // October 2019, Volume 45, Issue 10. – pp 997–1000
20. Impedance Spectroscopy of Polyaniline Films Modified by Carbon Particles/ Forsh P., Tameev A., Mazinov A., ..., Gribkova O., Tedoradze M.// Journal of Russian Laser Research – 2019. – V.40, № 3, P.249 – 254.
21. The offset of the quantum interband transitions in non-crystalline semiconductors / Mazinov A., Shevchenko A. // 2015. – Optical and Quantum Electronics. – 47(7). – p. 1659-1669.
22. The influence of defects on the energetic spectrum of noncrystalline semiconductors / Mazinov A.S., Shevchenko A.I., Terukov E.I // 2014 – Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics – 9(6) – p. 778-782.
23. Quantum interactions of optical radiation with the defect centers in the tails of the forbidden band of amorphous materials / Mazinov A., Shevchenko A., Bahov V. // 2014. – Optica Applicata. – 44(2). – p. 327-335.
24. Nanostructural semiconductors based on powder technology / Mazinov A.S., Shevchenko A.I., Voskresensky V.M., Kuropatkin A.V. // 2014. – CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. – 6959611. – p. 740-741.
25. Наноструктурированные полупроводники, полученные порошковым методом / А. С. Мазинов, А. И. Шевченко, В. М. Воскресенский, В. С. Гурченко, А. В. Куропаткин, Е. И. Теруков, В. П. Афанасьев // Учёные записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия "Физико-математические науки". – 2014. – Т. 27 (66), № 2. – С. 107-114.
26. Analysis of model approaches for description of a near-surface p-n junction // Mazinov A.S., Shevchenko A.I. // 2013 – Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika). – 72(17). – p. 1601-1611.
27. Численно-аналитический подход и рабочие характеристики фронтальных р-п переходов / А.И. Шевченко, А.С. Мазинов, Л.Д. Писаренко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.–2013.–Специальный выпуск.Том1. № 8 (114). – С. 182–186.

28. Девиация диффузионных констант и её влияние на профиль мелко залегающего p-n перехода / А. Мазинов, Л. Писаренко, А. Шевченко // Техническая электродинамика: тем. вып. «Силовая электроника и энергоэффективность». – 2012. – Ч. 1. – С. 204–208.
29. The asymmetry of the distribution density volume uncompensated charge at the metallurgical p-n junction / Mazinov A.S., Shevchenko A.I., Bykov M.A. // 2012. – Journal of Nano- and Electronic Physics. – 4(3),03026.
30. Influence of the thickness of nanosized silicon nitride films on a stoichiometric composition / Mazinov A.S., Bahov V.A., Karavainikov A.V. // 2012. – CriMiCo 2012 - 2012 22nd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. – 6336152. – p. 695-696.
31. Влияние структурной неоднородности на проводимость полупроводниковых материалов. / В.А. Бахов, А.С. Мазинов, Е.А. Наздёркин, Л.Д. Писаренко // Электроника и связь – 2011. – Т.4(63). – С.11-14.]
32. Nanodimensional heterostructures, from experiment to theory / Mazinov A.S., Bahov V.A., Nazderkin E.A. // 2011. – CriMiCo 2011 – 2011 21st International Crimean Conference: Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. – 6069154. – p. 793-794.
33. Детализация локализованных уровней неупорядоченных полупроводниковых структур / В.А. Бахов, А.С. Мазинов, Л.Д. Писаренко // Электроника и связь – 2010. – №1(54). – С.12-16.
34. Influence of aperiodicity of nanoscale structures on the resistance / Mazinov A.S., Bakhov V.A., Karavainikov A.V. // 2010. – KpbiMuKo 2010 CriMiCo - 2010 20th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. – 5632863. – p. 840-841.
35. Localized states of nanodimensional semiconductor structures / Mazinov A.S., Bahov V.A., Nazderkin E.A. // 2009. – KpbiMuKo 2009 CriMiCo - 2009 19th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. – 5292961. – p. 623-624.
36. Research of spectral descriptions films of amorphous hydrogenated silicon received magnetron method with use of the ionic source / Slipchenko N.I., Bykov M.A., Mazinov A.S. // 2008. – Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 7008700811.
37. Модель фотогенерации и переноса носителей в структуре a-Si:H/c-Si. / М.А. Быков, А.М. Быков, С.А. Зуев, А.С. Мазинов, Н.И. Слипченко, Д.А. Унжаков // Прикладная радиоэлектроника – Том 7, №1. – 2008. – С.71-76.
38. Исследование физических процессов в аморфных кремниевых пленках при различной концентрации водорода в плазме. / М.А. Быков, А.М. Быков, А.С. Мазинов, Н.И. Слипченко // Весник СумГУ. – Серия «Физика, математика, механика», №1. – 2008. – С.176-180.
39. Модель токопереноса носителей в тонких фотопреобразующих пленках на основе a-Si:H/ Слипченко Н.И., Быков М.А., Быков А.М., Зуев С.А., Мазинов А.С., Бахов В.А. // Вісник Сумського державного університету. Серія фізика, математика, механіка – 2008. – №2. – С.151-156.
40. Компьютерная программа для расчёта и построения зонной диаграммы полупроводникового диода на основе немонокристаллического материала с линейным

- распределением легирующих примесей / А.И. Шевченко, А.С. Мазинов и др. // Свидетельство 2017614699 РФ. Заявитель и правообладатель КФУ им. В.И. Вернадского (RU).- №2017610108; заявл. 10.01.2017; опубл. 26.04.2017, Реестр программ для ЭВМ.
41. Численно-аналитическая модель переноса носителей в фотопреобразователях на гетеропереходах a-Si:H – c-Si. / Н.И. Слипченко, М.А. Быков, С.А. Зуев, А.С. Мазинов // Автоматизированные системы управления и автоматики.– 2007.– 139. – С. 43-47.
42. Optical spectral characteristics of thin-film constructions on the basis of hydrogenated amorphous silicon / Bykov M.A., Mazinov A.S. // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2005. – 7008700811.
43. Influence of powerful pulse electromagnetic fields on household devices. A. A. Borisov, V.V. Starostenko ; E.V. Grigor'ev ; S.A. Zuev ; A.C. Mazinov ; G.B. Churumov ; D.A. Unjakov// 15th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology, Sevastopol, Crimea.2005, p. 699-700 Vol. 2. DOI: 10.1109/CrMiCo.2005.1565099.
44. Воздействие импульсных электромагнитных полей на бытовые приборы с жидкокристаллическими экранами / Е.В. Григорьев, С.А. Зуев, В.В. Старостенко, Г.И. Чурюмов, А.С. Мазинов, Д.А. Унжаков // Прикладная радиоэлектроника – ХТУРЕ, Харьков – 2005. – том 2, №2. – С. 232-235.
45. Влияние концентрации водорода в магнетронной камере на гидрирование кремниевой аморфной пленки. / А.С. Мазинов, Е.В. Лисовец, А.В. Каравайников // Вестник Сумского государственного университета. – Серия «Физика, математика, механика 2004». – №10(69'). – С.101-106.
46. Тонкопленочные фотогальванические элементы на основе аморфных кремниевых сплавов / Ю.Е. Гордиенко, Д.Р. Яковлев, А.С. Мазинов // "Радиоэлектроники и информатики" – Харьков, № 5. – 2002. – С. 78-81.
47. Тонкопленочные структуры на основе аморфного кремния. / А.С. Мазинов, Е.В. Лисовец, А.В. Каравайников // Ученые записки Таврического национального университета. – Серия «Физика» – 2002. – Том 3. – с.69-73.
48. Photoelectric Silicon Film Transducers Produced by Magnetron Sputtering. Mazinov A.S. Telecommunications and radioengineering 2001 Vol. 55, No 9 pp. 88-93 DOI:10.1615/TelecomRadEng.v55.i9.110.
49. Theoretical investigations of photogeneration processes in wide-band-gap semiconductors with a variable energy gap / Mazinov A.S., Pashaev E.Kh. // 1997. – Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika). – 33(2). – p. 5-8.
50. Способ изготовления полупроводниковых структур. Власов С.И., Насиров А.А., Мазинов А.С. Авторское свидетельство №1797405 Заявка №4877644- 1992 г.