

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Мазинова Алима Сеит-Аметовича

**«Особенности взаимодействия электромагнитных волн
с проводящими и полупроводниковыми наноструктурированными
средами»,**

представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальностям

1.3.4 - Радиофизика и 1.3.11 - Физика полупроводников.

Актуальность. Одной из современных проблем радиофизики и физики полупроводников с учетом современных тенденций развития информационных технологий и элементной базы полупроводниковой аппаратуры, увеличения степени интеграции активных элементов и перехода на нанометровые технологии является установление радиофизических закономерностей и связей при взаимодействии электромагнитного излучения сверхвысокочастотного, инфракрасного и видимого диапазонов с наноразмерными и наноструктурированными искусственными средами, сформированными на основе металлизированных, кремниевых, углеродных и органических материалов.

В связи с этим тема диссертационной работы Мазинова А.С., посвященной теоретическому и экспериментальному исследованию особенностей взаимодействия электромагнитных волн с проводящими и полупроводниковыми наноструктурированными средами и обоснованию физических механизмов преобразования радиоволнового излучения с учетом влияния пространственной зависимости параметров проводящих и полупроводниковых материалов и композитных структур, возникновения кантовых эффектов, **является актуальной.**

Содержание и структура диссертационной работы

Диссертационная работа, общим объёмом 327 страниц, включает в себя введение, шесть глав, заключение, основные сокращения и список литературы из 299 наименований задействованных литературных источников.

Иллюстрационный материал пронумерован по главам и содержит 180 рисунков и 5 таблиц. Работа по структуре и объему соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и вытекающие из неё задачи. Показана научная новизна, обоснованы научная и практическая значимость результатов работы, аргументирована достоверность полученных результатов и выводов. Достаточно кратко описана апробация защищаемых результатов на конференциях, симпозиумах, круглых столах. Приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту. Описана структура и объём работы.

В первой главе дан краткий обзор современных методов писания взаимодействия электромагнитных волн с наноструктурированными системами. Представлены основные подходы к установлению взаимосвязи электродинамических свойств наноструктур с их электрофизическими характеристиками. В заключительной части приведены технологические методы получения проводящих и полупроводниковых наноразмерных структур, взаимодействующих с излучением, которые базируются как на традиционных для полупроводниковой технологии методах (магнетронное и ионное распыление монокристаллических мишеней), так и на новых, предназначенных для органических с проводящими и полупроводниковыми материалами.

Вторая глава. В первых двух подразделах приводятся схемные решения, используемые для экспериментальных исследований взаимодействия электромагнитных волн с проводящими и полупроводниковыми пленочными структурами в сверхвысокочастотном и оптическом диапазонах. Третий подраздел посвящен методике измерения проводимости на постоянном и низкочастотном токе диэлектрических, полупроводниковых и проводящих пленочных образцов, в том числе на основе наноструктурированных форм углерода и органических материалов.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона с наноструктурами, на основе проводящих и

полупроводниковых пленок. Из сопоставления методик измерения в волноводном тракте и в свободном пространстве, в качестве основного инструмента выбран волноводный метод. Подробно исследованы структуры поверхностей нанометровых проводящих пленок в металлодиэлектрических структурах, явления аномального поглощения электромагнитного излучения в сверхтонких проводящих пленках, влияние способа напыления пленки на пространственный резонанс. Отдельным подразделом представлены результаты экспериментального исследования воздействия на тонкие пленки металлодиэлектрических структур мощного электромагнитного поля, приводящего к деградации проводящей структуры наноматериала.

Четвертая глава включает экспериментальные результаты исследования взаимодействия электромагнитного излучения терагерцового, инфракрасного и оптического диапазона с наноструктурами на основе проводящих, полупроводниковых и органических материалов, а также особенности проводимости металлических, полупроводниковых и органических пленочных наноструктур.

Зависимости коэффициентов отражения и пропускания сверхтонких проводящих пленок в зависимости от длины оптического излучения рассмотрены на базе алюминиевых слоев толщиной 1 – 10 нм. Показана корреляция между нелинейным увеличением коэффициента отражения и увеличением толщины пленок в диапазоне от 0 до 5 нм. Отмечено совпадение этого значения толщины с толщиной алюминиевой пленки, обеспечивающей максимум поглощения электромагнитных волн в СВЧ-диапазоне.

Поглощение оптических волн в некристаллических полупроводниковых структурах рассмотрено на основе аморфных пленок кремния, полученного методом магнетронного распыления кристаллической мишени. При этом показана возможность смещения края фундаментальной полосы поглощения посредством изменения парциального давления водорода в рабочей камере при осаждении пленок некристаллического кремния.

Дальнейшие исследования описывают дифракционные свойства некристаллических сред, сформированных на основе наноструктурированного

кремния и фуллерена, полученных методом сублимирования в высокотемпературной плазме. Рассмотрено взаимодействие оптических электромагнитных волн с пленками, осажденными из взвесей кремния и углерода, с пролонгацией исследований спектров на органические материалы, сформированные из производных изатинов и гидразонов.

Также были выполнены исследования в оптическом диапазоне частот фотоэлектрических характеристик гетероструктур на основе кристаллического и аморфного кремния, углерод-органических материалов.

В заключительном параграфе четвертой главы, представленные экспериментальные зависимости проводящих свойств исследуемых слоев подтверждают выводы, полученные из анализа экспериментальных спектральных зависимостей коэффициентов поглощения, отражения и пропускания для проводящих пленок, приведенных в третьей главе. Для полупроводниковых исследуемых структур, приводятся также температурные зависимости проводимости и энергии активации в зависимости от синтезируемой структуры.

В пятой главе представлены различные подходы теоретического описания взаимодействия электромагнитного излучения сантиметрового диапазона с тонкими проводящими пленками, базирующиеся на анализе электронного транспорта в исследуемых структурах. Аналитический подход, основанный на однородности параметров нанослоя и его границ, позволил выявить основные соотношения между напряженностью электрической компоненты поля и удельной проводимостью нанопленок с коэффициентом поглощения равным 50% для толщин >2 нм.

Использование кинетического уравнения Больцмана для описания транспортных явлений в пленках позволило получить аналитическую зависимость удельной электропроводности нанослоя от его толщины, удовлетворительно описывающую электродинамические характеристики слоя с пониженной размерностью.

Рассмотрение квантования электронного спектра носителей заряда, как для периодических, так и некристаллических структур позволило предложить корректное описание взаимодействия электромагнитного излучения с

наноструктурами с учетом широкого спектра дефектов, приводящих к нарушению симметрии строения атомной решетки.

С использованием метода связанных волн показано, что для адекватного описания коэффициентов отражения, прохождения и отражения электромагнитной волны, взаимодействующей с нанослоем необходимо учитывать степень покрытия подложки проводящим материалом.

В последнем параграфе пятой главы, приводятся результаты описания предельного воздействия электромагнитных волн на проводящие пленки. Базируясь на пакетах прикладных программ, диссертанту удалось описать физику пробоя, перпендикулярного вектору напряженности падающего излучения, и объяснить транспортные явления в структурах пониженной размерности, которые приводят к нелинейной дифракции при воздействии мощных электромагнитных полей.

Шестая глава в основном посвящена исследованию поглощения электромагнитного излучения оптического диапазона в кристаллических и некристаллических структурах. Разделив эти два процесса, диссертант отдельно рассматривает поглощение электромагнитного излучения на квазикристаллической составляющей, образованной не идеальностью функциональных слоев оптоэлектронных приборов. Теоретическое моделирование оптических явлений на дефектной составляющей некристаллических сред в работе опирается на детализацию электронного спектра в хвостах запрещенной зоны, в которой локализация отдельного дефекта определяется его псевдопериодичностью.

В финальном параграфе шестой главы, показано влияние дефектности кристаллической структуры на точность построения потенциальных барьеров, используемых в фотоэлектрических преобразователях электромагнитного излучения оптического диапазона. Численно-аналитическая модель построения встроенного потенциала позволяет построить зонную диаграмму многослойных структур и дает возможность рассчитать характеристики контактного потенциального барьера с переменной шириной запрещенной зоны для создания широкополосных преобразователей излучения.

В заключении приведены основные результаты и сформулированы выводы диссертационной работы.

Список основной используемой литературы состоит из ссылок на отечественные и зарубежные публикации и в основном опирается на журнальные статьи рейтинговых журналов. Также содержит признанные монографии по радиофизике и физике полупроводников.

Научные положения, выносимые на защиту:

- Природа аномального поглощения электромагнитного излучения гигагерцевого диапазона сверхтонкими проводящими покрытиями обусловлена резистивными потерями, которые обусловлены островковой структурой тонкопленочной среды.
- Деградационные 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.

Среди **новых научных результатов**, полученных автором, к **наиболее значимым** с научной точки зрения можно отнести следующие:

1. Теоретическое и экспериментальное обоснование природы аномального поглощения электромагнитного излучения гигагерцевого диапазона сверхтонкими проводящими и полупроводниковыми покрытиями при толщинах менее 10 нм резистивными потерями с учетом островковой структурой тонкопленочной среды.

2. Теоретическое обоснование деградиационного воздействия мощных электромагнитных полей СВЧ-диапазона на тонкопленочные (толщиной в несколько нанометров) металлизированные среды, стимулирующего тепловой пробой, направленный перпендикулярно электронной компоненте падающей электромагнитной волны.

3. Установление возможности управления смещением края фундаментальной полосы поглощения от 0,6 до 1 мкм гидрогенизированного аморфного кремния, полученного магнетронным методом, изменением парциального давления водорода в аргоноводородной плазме при осаждении плёнок.

4. Обнаружение зависимости края фундаментального поглощения оптического излучения плёнок самоорганизованных фуллереновых сред, осажденных из

взвесей различных растворителей, от типа растворителей и возможности управлением краем поглощения в пределах 1,74–1,91 эВ.

5. Установление аналитической зависимости удельной электропроводности нанослоя от его толщины, полученной в результате решения кинетического уравнения Больцмана, обеспечивающей удовлетворительное описание электродинамических характеристик проводящего слоя с пониженной размерностью.

6. Представление сложной природы взаимодействия оптического излучения с некристаллическими полупроводниковыми средами, как поглощение квазикристаллической и дефектной частями. При этом, смещение края поглощения и увеличение ширины запрещённой зоны, для квазикристалла, относительно идеальной решётки, можно описать посредством введения энергетической добавки в решение уравнения Шредингера, а взаимодействие электромагнитного излучения с дефектной структурой немонокристаллических полупроводников можно описать с помощью представления поглощения электромагнитного излучения как суммы поглощений на различных видах дефектов, при этом однотипные дефекты имеют подобные резонансные частоты поглощения и могут быть описаны псевдопериодичностью.

7. Рассмотрение квантования электронного спектра носителей заряда, как для периодических, так и некристаллических структур позволившее предложить корректное описание взаимодействия электромагнитного излучения с наноструктурами с учетом широкого спектра дефектов, приводящих к нарушению симметрии строения атомной решетки.

8. Построение модели широкополосных фотоэлектрических преобразователей на основе многослойных пленочных структур некристаллических полупроводников с учетом неидеальности их атомной структуры.

Практическая значимость полученных диссертантом результатов заключается:

- в получении результатов экспериментальных исследований наноразмерных и наноструктурированных проводящих, полупроводниковых и диэлектрических сред при воздействии электромагнитных полей;

- в установлении закономерностей по взаимодействию электромагнитного излучения СВЧ диапазона, с наноразмерными проводящими и углеродными тонкопленочными средами, необходимых для разработки широкополосных поглощающих покрытий, не только на твердых, но и на гибких основах, проектирования элементов микроэлектроники с пространственно неоднородными структурами;
- в установлении закономерностей взаимодействия излучения оптического диапазона с кремниевыми, углеродными и органическими гетероструктурами, применяемыми при разработке электронных и оптоэлектронных полупроводниковых приборов, интегральных устройств, приёмников и излучателей терагерцового диапазона;
- в разработке и использовании теоретических моделей, позволяющих выявить основные радиофизические закономерности преобразования радиоволнового излучения с учетом влияния пространственной зависимости параметров проводящих и полупроводниковых материалов и композитных структур, возникновения кантовых эффектов.

Обоснованность и достоверность полученных диссертантом результатов.

Анализируя диссертационную работу Мазинова А.С. можно утверждать, что автором выполнен большой комплекс экспериментальных исследований, с использованием современной измерительной аппаратуры и апробированных методов измерений, обработка экспериментальных данных проведена с использованием стандартных апробированных методов, результаты которых представлены в третьей и четвертой главах. Корректность математических методов, использованных при проведении теоретического анализа, результаты которого представлены в пятой и шестой главах, позволило адекватно описать зафиксированные экспериментально данные.

Можно утверждать, что научные положения и выводы сформулированные А.С. Мазиновым представляются обоснованными и достоверными.

Основные научные результаты достаточно полно опубликованы в более чем 50 научных публикациях, в том числе в 29 статьях в рецензируемых научных изданиях и изданиях, входящих в международные наукометрические базы

(Scopus, Web of Science). А также в других журналах ВАК РФ по смежным специальностям, свидетельстве о регистрации программы на ЭВМ. Результаты работы прошли апробацию на более чем пятидесяти Всероссийских и международных научных конференциях и симпозиумах, посвященных вопросам радиофизики, радиоэлектроники и физики полупроводников.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Публикации соискателя, представленные в заключительной части автореферата, а также распределенные в литературных ссылках диссертации, полностью освещают материал диссертации и удовлетворяют требованиям постановления Правительства Российской Федерации № 842 "О порядке присуждения ученых степеней" (вместе с "Положением о присуждении ученых степеней") от 24 сентября 2013 года и постановлением Правительства Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 723 "Об особенностях присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий лицам, признанным гражданами Российской Федерации в связи с принятием Российской Федерацию Республики Крым и образованием в составе Российской Федерации новых субъектов - Республики Крым и города федерального значения Севастополя".

Соответствие содержания научным специальностям. Диссертация А.С. Мазина посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию особенностей взаимодействия электромагнитных волн с проводящими и полупроводниковыми наноструктурированными средами и обоснованию физических механизмов преобразования радиоволнового излучения с учетом влияния пространственной зависимости параметров проводящих и полупроводниковых материалов и композитных структур, возникновения кантовых эффектов. Она соответствует научным специальностям согласно приказу Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118 «Об утверждении номенклатуры специальностей, по которым присуждаются ученые степени, ...» 1.3.4 - Радиофизика и 1.3.11 - Физика полупроводников со соответствующим направлениями исследования.

По специальности «Радиофизика» в части направлений: «Разработка физических основ генерации, усиления и преобразования колебаний и волн

различной природы (электромагнитных, акустических, плазменных, механических), а также автоволн в неравновесных химических и биологических системах. Поиск путей создания высокоэффективных источников когерентного излучения миллиметрового, субмиллиметрового и оптического диапазонов, техническое освоение новых диапазонов частот и мощностей»; «Изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах».

По специальности «Физика полупроводников» – «Примеси и дефекты в полупроводниках и композитных структурах»; «Поверхность и граница раздела полупроводников, полупроводниковые гетероструктуры, контактные явления»; «Электронные спектры полупроводниковых материалов и композиционных соединений на их основе»; «Электронный транспорт в полупроводниках и композиционных полупроводниковых структурах»; «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках и в композиционных полупроводниковых структурах»; «Спонтанная и стимулированная люминесценция в полупроводниковых материалах и композитных структурах, полупроводниковые лазеры и светоизлучающие устройства»; «Некристаллические полупроводники. Органические полупроводники».

Однако работа не лишена отдельных *недостатков*:

1. В разделе 2 недостаточно чётко обосновано использование для измерения коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с проводящими нанослоями, образцов лишь частично перекрывающих сечение волновода.

2. В разделе 2 при описании измерительных методик недостаточное внимание уделено методам измерения толщины проводящих нанометровых слоёв.

3. В экспериментальных исследованиях достаточно подобно рассмотрены зависимости коэффициентов пропускания, отражения, поглощения от толщины для проводящих пленок (глава 3), но не рассмотрены аналогичные зависимости для полупроводниковых кремниевых, углеродных и органических структур.

4. В разделе 3 для установления антенного эффекта при воздействии электромагнитного излучения высокого уровня мощности на полупроводниковые микросхемы было бы желательно привести зависимости предельного режима работы микросхемы от частоты воздействующего излучения.

5. В разделе 4 автор на основе наличия максимума на частотной зависимости проводимости исследуемых органических пленок в низкочастотной области делает вывод о прыжковом механизме их проводимости, однако в диссертации эти зависимости не приведены.

6. В разделе 5 автором получена аналитическая зависимость удельной электропроводности нанослоя от его толщины, однако не приведено сравнение этой зависимости с известными в научной литературе аналогичными зависимостями.

7. В разделе 5 автором с использованием квантово-механического подхода объяснено увеличение удельного сопротивления металлической нанопленки вследствие нарушения периодичности в расположении атомов, приводящее к образованию узких запрещенных зон в энергетическом спектре электронов проводимости. Однако, автором не рассмотрен вклад механизма рассеяния электронов на границах нанопленки, приводящий к уменьшению подвижности электронов, в уменьшение удельной электропроводности нанопленки.

8. К стилистическим замечаниям стоит отнести неудачные формулировки в подписях к некоторым рисункам. Например, «рис. 5.4 Увеличение относительной напряженности при уменьшении толщины плёнок» или «рис.5.5 Отношение средней относительной напряженности к коэффициенту поглощения для плёнок с толщинами от 3 до 10 нм».

9. В качестве замечания можно также отметить применение как линейного, так и логарифмического масштабов на графиках при построении коэффициентов отражения, прохождения и поглощения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона в разделе 3.

Общее заключение по диссертационной работе:

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера, поэтому не снижают ценность проведенных исследований и не влияют на общее

положительное впечатление о диссертационной работе *Мазинова Алима Сеит-Аметовича*.

Считаю, что диссертационная работа *Мазинова Алима Сеит-Аметовича* «Особенности взаимодействия электромагнитных волн с проводящими и полупроводниковыми наноструктурированными средами» соответствует критериям п. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявленных к докторским диссертациям, а соискатель заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальностям 1.3.4 - Радиофизика и 1.3.11 - Физика полупроводников.

Заведующий кафедрой физики твердого тела института физики, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»
доктор физико-математических наук,
профессор

Скрипаль Александр Владимирович

« 25 » апреля 2022 г.

Подпись заведующего кафедрой физики твердого тела института физики, доктора физико-математических наук, профессора Скрипаля Александра Владимировича

ЗАВЕРЯЮ

Учёный секретарь
ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»
кандидат химических наук, доцент

Федусенко Ирина Валентиновна

Служебный адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.

ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»

Телефон: +7 (8452) 51-14-30

E-mail: skripala_v@info.sgu.ru

Научная специальность докторской диссертации Скрипаля Александра Владимировича 01.04.10 – Физика полупроводников и диэлектриков, 01.04.03 – Радиофизика.