



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования

«Национальный исследовательский  
Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского»  
(ННГУ)

Гагарина пр., 23, г. Нижний Новгород,  
Россия, ГСП-20, 603950  
Тел. (831)462-30-90 Факс (831)462-30-85  
e-mail: unn@unn.ru

15.03.2022 № 13-4/66  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**

проректор ННГУ  
им. Н. И. Лобачевского  
по научной работе, д.ф.-м.н.

М.В. Иванченко

«15» марта 2022 г.



### ОТЗЫВ

ведущей организации 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

Представленная А.С. Мазинным диссертационная работа посвящена широкому кругу задач радиофизики и физики полупроводников, которые стоят перед разработчиками новых радиоэлектронных систем. Как следует из названия темы, ключевым аспектом исследования являлось нахождение закономерностей между явлением преобразования энергии электромагнитных волн и свойствами проводящих и полупроводниковых материалов.

Нужно отметить, что рассматриваемые в работе естественные и искусственно синтезированные среды формировались на основе металлов (алюминий, медь, титан) и полупроводников (кремний, производные углерода), достаточно широко использующихся в широкомасштабном производстве радиоаппаратуры и радиоустройств.

Основными полосами рабочих частот исследования являлись диапазоны 2 – 25 ГГц и 300 – 600 ТГц, в которых, на настоящий момент, сосредоточены основные каналы приема передающих устройств систем связи. Гигагерцовый диапазон используется в активных системах радиофизических измерений, радиолокаций, промышленных и бытовых системах.

Актуальным аспектом работы также является взаимодействие электромагнитных волн с пленочными структурами, лежащими в основе современной микро- и нанoeлектроники. Тенденция развития данной отрасли связана с уменьшением толщины основных функциональных элементов, что обусловлено меньшими временами пролёта электронов и, как следствие, с увеличением быстродействия диодов и транзисторов, а это, в свою очередь, дает возможность задействования более высоких частот. Выполнение этого условия также необходимо для уменьшения массы конечного прибора при минимальных рабочих объёмах измерительных радиофизических и радиоэлектронных систем. Уменьшение линейных размеров элементов полупроводникового прибора обеспечивает снижение потерь мощности при формировании полезного сигнала.



Однако, при взаимодействии с мощными электромагнитными полями эти элементы подвергаются высоким негативным воздействиям, которые обусловлены более высокими плотностями энергий. Именно этому вопросу Мазин А.С. уделяет отдельное внимание. Актуальность решения радиофизической задачи защиты радиотехнических устройств от воздействия внешних СВЧ-излучений возрастает в связи с появлением беспилотных транспортных средств. Как наземные, так и воздушные устройства пилотируются дистанционно, а их управление полностью зависит от стабильности и надежности работы полупроводниковых интегральных микросхем. В тоже время стойкость функциональных слоев микросхем рассматривалась интегрально, а физические явления, протекающие при этом в них, рассмотренные соискателем, практически не исследовались.

Другим важным аспектом, представленной диссертации, является взаимодействие электромагнитных волн терагерцового диапазона с полупроводниковыми, углеродными и органическими материалами. Намечавшиеся устойчивые тенденции использования углеродных и органических полупроводниковых материалов в значительной мере стимулировали расширение исследований в области органической оптоэлектроники. При этом, актуальными задачами являются исследования проводящих свойств, флуоресценции и квантовой эффективности органических материалов, многообразие форм которых позволяет значительно увеличить разнообразие электронных приборов, используемых в практической радиофизике. В качестве примера стоит отметить то, что практически все современные высокоэффективные синие OLED строятся на гетероструктурах, состоящих из множества органических слоев. Данная особенность позволяет повысить инжекционные, транспортные и рекомбинационные свойства для носителей заряда излучающего слоя. Также, полупроводниковые наноструктуры, основанные на органике, вносят значимый вклад в разработку полупроводниковых устройств и позволяют снизить стоимость конечного продукта, упростить процесс структурной модификации и производства в целом, уменьшить вес готового полупроводникового устройства.

#### **Соответствие отрасли науки и значимость полученных результатов**

Диссертация Мазина А.С. состоит из введения, шести глав и списка литературы (299 ссылок). Формальные признаки оформления работы соответствуют требованиям ВАК РФ и отвечают системе стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу национального стандарта Российской Федерации ГОСТ 7.0.11-2011. Общий объем рукописи составляет 327 страниц машинописного текста, набранного 14 шрифтом. Графический материал, в количестве 180 рисунков, равномерно иллюстрирует излагаемый контент со ссылками на литературные источники, встроенными в основной текст с соблюдением условия первичности.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование и теоретические изучения дифракционных, оптических и электрических характеристик сред, сформированных на основе проводящих и полупроводниковых материалов, взаимодействующих с электромагнитными волнами гига- и терагерцового диапазонов.

**Во введении** обоснованы актуальность и новизна представленных исследований и их тесная связь с научными исследованиями по направлениям радиофизики и физики полупроводников.

**Первая глава** посвящена обзору существующих подходов к описанию распространения и трансформации электромагнитных волн в сложных, неоднородных средах, а также дается ряд модельных представлений проводящих и полупроводниковых структур, взаимодействующих с электромагнитным излучением. Кратко приводятся задействованные технологии получения рабочих сред, осажденных методами ионного, магнетронного и химического осаждения.

**Во второй главе** приведено подробное описание постановки экспериментальных исследований по теме диссертационной работы. Автором показано, что используемый набор измерительных схем обусловлен в первую очередь достаточно большим спектральным диапазоном электромагнитных волн, который начинается от единиц гигагерц и заканчивается сотнями терагерц. Также это определяется своеобразной



спецификой, которую вносит непосредственная структура тонких (сверхтонких) проводящих и полупроводниковых плёнок, взаимодействующих с энергией, длина волны которой в отдельных случаях превосходит их толщину на несколько порядков.

**В третьей главе** представлена совокупность экспериментальных исследований взаимодействия электромагнитного излучения гигагерцового диапазона с пленочными структурами, осажденными на твердые и гибкие диэлектрические подложки, имеющие разную совершенство поверхности. Нужно отметить, что данный раздел диссертации в большей степени соответствует специальности «Радиофизика», в частности, направлениям исследования в области линейных и нелинейных процессов дифракции, рассеяния и трансформации электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона в отрезке частот от 2 до 25 ГГц. В качестве искусственно создаваемых сред, рассматриваются проводящие слои полученные магнетронным и ионным методами из твердотельных мишеней алюминия, меди, титана, никрома и других металлов. В меньшей степени, в этой главе затронуты области исследования специальности «Физики полупроводников», частично, параграф 3.1. «Аномальное поглощение энергии СВЧ волн в наноразмерных проводящих средах», в котором дается влияние физических свойств проводящих структур пониженной размерности, то есть аномальное поглощение сверхтонких пленок толщинами 5 – 7 нм. В параграфе 3.3. «Взаимодействие СВЧ излучения с кремнием и углеродными материалами» рассмотрены характеристики взаимодействия полупроводниковых материалов и композитных структур, позволяющие исследовать физические свойства некристаллических полупроводников, в том числе и органических материалов. Коэффициенты прохождения и отражения электромагнитных волн приводятся для искусственно сформированных полупроводниковых углеродных и органических структур методом полива и центрифугирования.

**В четвертой главе** описаны экспериментальные зависимости полученные Мазинным А. С. при взаимодействии электромагнитных волн оптического диапазона с проводящими и полупроводящими средами.

Первично представленные радиофизические исследования спектров пропускания и отражения при взаимодействии излучения с проводящими тонкопленочными средами, совместно с 3D сканированием на атомно-силовом микроскопе отвечают обоим научным специальностям в части исследования физических основ преобразования электромагнитных волн в структурах пониженной размерности. Имеющие наноразмерную метрику 1-10 нм, подобные среды демонстрируют нелинейное возрастание поглощения волновой энергии на толщинах металлизации 5 – 7 нм.

Анализ коэффициентов отражения и поглощения тонких плёнок кремния, опирающийся на дефектность его некристаллической решётки, при котором край полосы поглощения изменяется от 0,62 до 1,1 мкм, соответствует специальности «Радиофизика» в области исследования и разработки физических основ преобразования электромагнитных волн и поиск путей создания высокоэффективных радиофизических приемников излучения оптического диапазона. С точки зрения прикладного аспекта данные исследования могут быть востребованы при решении радиофизических задач по разработке и созданию новых электродинамических систем и устройств формирования радиосигналов в оптическом диапазоне.

Аналогичным образом можно охарактеризовать частотные зависимости спектров поглощения плёнок фуллерена и найденные изменения их электрофизических свойств, при использовании растворителей различной природы, которые позволяют смещать край фундаментального поглощения углеродной среды, выстраиваемой посредством изменения стехиометрии плёнок фуллерена C<sub>60</sub>.

Трансформации волн ультрафиолетового диапазона в модернизированных органических средах 3-метил-1-фенил-4-формил-пирозол-5-он и 4 метилфенилгидразон N-изоамилизатина, дающие пики люминесценции в области 450 - 600 нм, отвечают научным разделам специальности «Физика полупроводников» «Спонтанная и стимулированная люминесценция в полупроводниковых материалах», а также в части исследований



«Органические полупроводники». С точки зрения специальности 1.3.4 данные исследования интерпретируются согласно направлению «Поиски путей создания высокоэффективных источников когерентного излучения оптического диапазона, техническое освоение новых диапазонов частот».

Показанное усиление оптоэлектронных свойств, до 30 раз, гетероструктур фуллерен-гидразон при облучении широкополосным излучением видимого диапазона, является перспективным прикладным направлением для создания высокоэффективных оптоэлектронных приемников сформированных на основе искусственных сред, базирующихся на орбаноуглеродных полупроводниковых структурах. При этом максимальное увеличение прямых токов удалось достичь до трех порядков.

Завершающие четвертую главу исследования проводящих свойств материалов, в которых затрагиваются вопросы электронного транспорта носителей, можно рассматривать как исследования, проводимые в рамках обеих специальностей.

*Пятая глава* представляет серию теоретических подходов, позволяющих более детально рассмотреть взаимосвязь трансформации электромагнитных полей с электронным транспортом наноразмерных структур, опираясь при этом на последовательный подход к рассмотрению преобразования энергии электромагнитных волн и поступательное движение носителей заряда.

В этом ключе наиболее спорным является механизм формирования наноразмерных проводящих сред с толщинами от 0 до 10 нм, когда происходит рост сплошной проводящей среды и появление однозначной удельной проводимости, определяющей ее электродинамические характеристики. Тесная связь процессов отражения, прохождения и поглощения излучения гигагерцового диапазона с проводящими свойствами наноразмерных сред, первоначально рассматривается в приближении однородности параметров нанослоя и границ. Показано, что для проводящих структур толщиной 2 нм поглощение падающей электромагнитной волны 50 % достигается при проводимости порядком  $10^6$  См/м и отношении напряженностей наведенного к падающей не более 0,6.

При описании кинетики электронного транспорта носителей, участвующих в преобразовании энергии падающей электромагнитной волны, стоит выделить два подхода. Первый, задействует кинетическое уравнение Больцмана и позволяет получить аналитическую экспоненциальную зависимость удельной проводимости от толщины наноструктуры. Показано, что максимум поглощения реализуется при толщине проводящего слоя 5 нм, при предельной проводимости равной  $3,5 \cdot 10^7$  См/м и дает хорошую корреляцию с экспериментальными исследованиями третьей главы.

Второй, более строгий – учитывает влияния квантовых явлений квантовой радиофизики в структурах пониженной размерности при поглощении электромагнитных волн. Получено, что для наноразмерных сред толщинами менее 10 нм необходимо учитывать симметрию строения её атомной решётки проводящей среды, нарушение которой может привести к расщеплению проводящей зоны. В свою очередь это влияет на проводимость тонкой металлической среды и её электродинамические характеристики, при которых отражение падает до 10%, а поглощение возрастает до 50%.

Подводя краткий итог анализа пятой главы стоит отметить, что представленные в ней теоретические характеристики и их сопоставление с экспериментальными результатами третьей главы в большей степени отвечают радиофизике в области изучения линейных и нелинейных процессов распространения, дифракции, рассеяния, и взаимодействия волн в естественных и искусственных средах. Их значимость определяется возможностью использования полученных закономерностей и зависимостей в разработках и создания новых электродинамических систем и устройств формирования радиосигналов (фильтров, аттенуаторов, поглотителей, ...) в сверхвысокочастотном диапазоне, а также моделирование свойств и физических явлений в СВЧ полупроводниковых микросхемах, процессорах, элементах памяти, включая технологические процессы при их проектировании.



*В шестой главе* даётся теоретический подход, позволяющий описать общие закономерности взаимодействия электромагнитных волн терагерцового диапазона с некристаллическими полупроводниковыми структурами. Коэффициент поглощения представлен суммой квазикристаллического и дефектного коэффициентов. Смещение края поглощения и увеличение ширины запрещённой зоны до 1,8 эВ, для квазикристалла, относительно монокристалла, описывается введением энергетической добавки в уравнения Шредингера.

Задействована детализация электронного спектра в хвостах запрещенной зоны, в которой локализация отдельной неоднородности определяется его псевдопериодичностью. Каждый тип дефекта создает двухуровневую резонансную подсистему, имеющую собственную колебательную частоту, на которой поглощается соответствующая мода падающего излучения. Поглощения, в низкочастотной области оптического диапазона, представляется набором подобных резонаторных центров, которые характеризуются двумя введенными параметрами ( $\xi_j$ ,  $b_j$ ).

Данная, заключительная глава, соответствует следующим сформулированным научным областям специальностей, на которые претендует соискатель. Для специальности «Радиофизика» – это разработка физических основ преобразования электромагнитных волн и поиски путей создания высокоэффективных приемников излучения оптического диапазона, техническое освоение новых диапазонов частот, а также изучение линейных и нелинейных процессов распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации электромагнитных волн терагерцового диапазона в естественных и искусственных средах. Для специальности «Физика полупроводников» - рассмотрены электронные спектры некристаллических полупроводниковых материалов и оптические явления в них.

Значимость завершающей главы диссертации отражается в перспективности использования полученных закономерностей поглощения электромагнитных волн и трансформации их энергии колебательными центрами некристаллических полупроводниковых структур. Теоретически рассмотрены возможности построения варизонного потенциального барьера, преобразовывающего падающую электромагнитную волну в электронно-дырочную пару и влияния дефектности немонокристаллической структуры полупроводника на точность его построения.

Полученные результаты будут полезны для разработки и создания новых электродинамических систем и устройств формирования радиосигналов оптического диапазона и разработке физических принципов работы и создания оптоэлектронных и фотоэлектрических приборов на базе немонокристаллических полупроводниковых материалов.

Обобщая анализ содержания рассмотренной диссертации, в соответствии с требованием пункта 24 положения о присуждении ученых степеней (постановлением Правительства Российской Федерации №842) о ведущей организации, стоит отметить, что каждая из рассмотренных глав в большей или меньшей степени соответствует заявленным научным специальностям 1.3.4 - радиофизика и 1.3.11 - физика полупроводников. Специальности 1.3.4 - радиофизика - в следующих областях исследований: «Разработка физических основ генерации, усиления и преобразования колебаний и волн различной природы (электромагнитных, акустических, плазменных, механических). Поиски 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». Частично затрагивает аспекты исследований по направлению «Разработка и исследование новых электродинамических систем и устройств формирования и передачи радиосигналов: резонаторов, волноводов, фильтров и антенных систем в радио, оптическом и ИК – диапазоне».



В тесной взаимосвязи и выборочном соответствии работа соответствует специальности 1.3.11 - физика полупроводников в областях: «Структурные и морфологические свойства полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе»; «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»; «Транспортные и оптические явления в структурах пониженной размерности»; «Некристаллические полупроводники. Органические полупроводники»; «Моделирование свойств и физических явлений в полупроводниках и структурах».

#### **Достоверность и обоснованность**

Достоверность результатов, полученных в ходе выполнения диссертационного исследования, подтверждается сопоставлением теоретических и экспериментальных данных, использованием современного физического оборудования, многолетним проведением многочисленных экспериментальных исследований на различных приборах и системах, а в ряде случаев сопоставлением с данными ведущих российских и зарубежных ученых.

Обоснованность научных положений и результатов диссертационной работы А.С. Мазина подтверждена регулярным представлением материала, изложенного в диссертационной работе, в более чем пятидесяти международных и региональных конференциях и симпозиумах, в течение тридцати лет и его участием в международных и региональных научных программах, темах и грантах, связанных с диссертацией соискателя. Их тематика и направленность соответствует отрасли науки, в которую входят специальности 1.3.4 - радиофизика и 1.3.11 - физика полупроводников.

Публикационная апробация решенных задач и их новизны подтверждена более чем 50 печатными работами в журналах, 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 нормативным документам ВАК РФ. А также в других журналах ВАК РФ по смежным специальностям, свидетельством о регистрации программы на ЭВМ.

#### **Замечания и недостатки работы**

Изложенный в диссертации материал, однако, не лишен и некоторых недостатков:

1. На наш взгляд, недостаточно подробно приведены метрологические характеристики приборной составляющей экспериментальных установок, представленных в главе 2, в результате чего сложно судить о точности измерений.
2. В экспериментальной части, глава 3, частотные зависимости коэффициентов прохождения и отражения приводятся для отдельных отрезков длин волн, поэтому не понятно каковы частотные зависимости во всем заявленном диапазоне исследований.
3. В параграфе 3.4 не приводятся форм-факторы интегральных микросхем, подвергнутых воздействию импульсных электромагнитных полей, в связи с чем обобщение критериев воздействия требует уточнений.
4. Исследование электродинамических свойств органических структур далеки от совершенства. Нет четкой картины понимания электронного транспорта, определяющего проводящие свойства молекулярных систем.



5. Нет связи анализа проводимости органических сред (глава 4) с коэффициентами прохождения и поглощения (глава 3).
6. Выведенная в параграфе 5.4 проводимость, учитывающая квантование энергетической составляющей дефектов, не имеет подтверждения экспериментальными свойствами, исследованных тонкоплёночных структур.
7. В положении, выносимом на защиту утверждается, что 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. Однако это утверждение противоречит зонной теории, поскольку именно наличие периодичности приводит к образованию запрещенных зон, а не ее нарушение.
8. Рассматривая аморфные среды, не корректно использовать понятия псевдокристалличности и псевдопериодичности.

Сделанные замечания являются частными и не могут быть причиной снижения общей высокой оценки диссертационной работы Мазинова А.С. Они не ставят под сомнение достоверность проведенной работы и полученных результатов.

### **Заключение**

Рассмотренная рукопись Мазинова А.С. представляет научный и практический интерес. Диссертация является полным и законченным научным трудом. Подробный анализ структуры и соответствие её претендуем научным специальностям позволяет говорить о том, что содержание работы удовлетворяет области естественных наук и соответствует двум смежным научным специальностям 1.3.4 - радиофизика и 1.3.11 - физика полупроводников, входящим в группу научных специальностей 1.3 - физические науки. Диссертационная работа соответствует требованиям пунктов 9, 10, 11, 12, 13 и 14 раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г. (в редакции постановления Правительства РФ №335 от 21.04.2016г.), которым должны отвечать диссертации на соискание ученых степеней.

Автореферат дает полное представление о содержании диссертации, а Мазинов Алим Сеит-Аметович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 1.3.4 - радиофизика и 1.3.11 - физика полупроводников.

Экспертиза представленной диссертации была проведена на расширенном заседании кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники (ФПЭН) физического факультета ННГУ совместно с сотрудниками радиофизического факультета ННГУ. Был заслушан и обсужден доклад соискателя, обсуждался и корректировался проект отзыва, который заранее готовился членами, назначенными в экспертную комиссию. Положительный отзыв ведущей организации одобрен на заседании 10.03.2022г. протокол № 8. На расширенном заседании присутствовало 20 сотрудников. Результаты голосования: «за» - 20 чел., «против» – нет, «воздержались» – нет.

**Отзыв составили:**

Декан радиوفизического факультета, заведующий кафедрой теории колебаний и автоматического регулирования, ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского", доктор физико-математических наук (1.3.4 - радиофизика),

профессор \_\_\_\_\_ 15 марта 2022 г. МАТРОСОВ Валерий Владимирович  
([matrosov@rf.unn.ru](mailto:matrosov@rf.unn.ru), +7 902 304 6073)

Профессор кафедры физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники, ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского", доктор физико-математических наук (1.3.11 - физика полупроводников),

профессор \_\_\_\_\_ 15 марта 2022 г. ЕЖЕВСКИЙ Александр Александрович  
([ezhevski@phys.unn.ru](mailto:ezhevski@phys.unn.ru), +7 952 469 1236)

Заведующий кафедрой физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники, ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского", доктор физико-математических наук (1.3.8 - физика конденсированного состояния),

профессор \_\_\_\_\_ 15 марта 2022 г. ПАВЛОВ Дмитрий Алексеевич  
([pavlov@unn.ru](mailto:pavlov@unn.ru), +7 905 667 2218)

Подписи Матросова В.В., Ежевского А.А. и Павлова Д.А. заверяет:

Ученый секретарь ННГУ \_\_\_\_\_ Л.Ю. ЧЕРНОМОРСКАЯ

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)

Адрес: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

Телефон: +7 (831) 462-30-03

Электронная почта: [unn@unn.ru](mailto:unn@unn.ru)

Сайт: <http://www.unn.ru/>