

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации

Мазинова Алима Сеит-Аметовича

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

представленной на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук по специальностям

1.3.4 – радиофизика и 1.3.11 – физика полупроводников

Актуальность представленной научно-исследовательской работы заключается в неоспоримости того факта, что развитие телекоммуникационных технологий опирается на два основных научных направления: полупроводниковая электроника и электродинамика электромагнитных волн. Данное сочетание и позволило современному обществу шагнуть в новое информационное пространство. Именно этим двум направлениям и посвящены исследования соискателя. В тесном сочетании им исследуются общие закономерности трансформации электромагнитных волн сверхвысокочастотного и оптического диапазонов и электронные спектры полупроводниковых материалов и композиционных соединений, базирующихся как на традиционных полупроводниковых, так и органических структурах. Задействованные модельные подходы взаимодействия СВЧ и видимого излучения охватывают широкий круг вопросов, стоящие перед современными разработчиками приборов и радиотехнических систем.

Научная новизна и практическая значимость работы состоит в общности подходов к исследованию и анализу физических процессов дифракции и рассеивания электромагнитных волн широкого диапазона и материальных сред, сформированных на основе проводящих (алюминий, медь, титан) и полупроводниковых (кремний, соединения углерода, органические соединения) структур.

Полученные закономерности зависимости пространственной и омической неоднородностей проводящих наноразмерных слоистых структур от процессов преобразования энергии электромагнитных полей в тепловую энергию найдут свое применение в анализе работы и изготовления приборов, имеющих наноразмерные функциональные элементы. Ведь полученные 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, определяют предельные режимы эксплуатации. При этом, выведенная аналитическая зависимость проводимости тонких структур для диапазона $1,8 \cdot 10^6 - 3,8 \cdot 10^{7\text{См}}/\text{м}$ в зависимости от толщины металлизации легко аппроксимируется для низко-

и высокоомных проводников, позволяя встраивать их в расчетные пакеты программ по проектированию радиоэлектронных приборов и систем.

Модельные подходы взаимодействия электромагнитных волн оптического диапазона с некристаллическими полупроводниками, в пределах фундаментальной полосы поглощения, позволили объяснить природу смещения края фундаментальной полосы поглощения от 0,6 до 1 мкм в аморфном гидрогенизированном кремнии. Экспериментальные спектры, представленные суммой коэффициентов поглощения неоднородных и нелинейных сред, дают возможность управлять смещением полосы поглощения, вводя различные типы дефектов в упорядоченную монокристаллическую структуру полупроводниковых материалов.

Содержание работы. Работа состоит из шести глав, каждая из которых заканчивается выводами, кратко резюмирующих ее содержание. Общие выводы охватывают всё содержание диссертации и соответствуют поставленной цели и задачам исследования. Завершает рукопись список основной используемой литературы, состоящий из 299 источников, основу которых составляют публикации в изданиях отечественных и зарубежных авторов.

Особенности спектрального диапазона и специфика взаимодействия электромагнитного поля с наноструктурированными материалами, потребовали от соискателя привлечения как радиофизических, так электрофизических и оптических методов исследования, применяемых в физике полупроводников. Это позволило обеспечить достоверность экспериментальных результатов и адекватного анализа полученных данных. На основании сформулированных задач и используемых методов экспериментальных исследований в работе представлены результаты взаимодействия электромагнитных волн с тонкими и сверхтонкими проводящими, полупроводниковыми и органическими плёнками. При высокочастотных исследованиях были задействованы как волноводные измерения, так и метод открытого пространства. Естественным образом, метод открытого пространства наиболее предпочтителен, так как ограничения на размеры объектов сводят практически к нулю паразитные переотражения на образце. Исключить паразитные гармоники посредством использования специальной нормировки, что потребовало от диссертанта применение достаточно сложных и длительных нормировочных процедур.

Основными отличительными особенностями исследований в СВЧ диапазоне являлись:

- экспериментальные и теоретические исследования дифракционных характеристик металлодиэлектрических структур с проводящими и полупроводниковыми пленками толщиной от 1 нм до 10 мкм из различных материалов в волноводном тракте и свободном пространстве;

- результаты исследований влияния материала, толщины, способа напыления пленок на аномально высокое поглощение энергии электромагнитных полей проводящими пленками;
- результаты исследований частотных зависимостей преобразования энергии электромагнитных волн, в которых выявили слабую зависимость этого явления в диапазоне частот от 2 до 26 ГГц, что является ценным свойством при создании диапазонных поглощающих покрытий;
- результаты экспериментальных модельных исследований пробоя в тонких проводящих пленках мощными электромагнитными СВЧ полями, постоянным и низкочастотными переменными напряжениями;
- результаты численных расчетов интегральных дифракционных характеристик структур в волноводе и распределения токов в проводящих пленках, что объясняет особенности пробоя при воздействии электромагнитных полей и физические процессы при пробое в пленках металлодиэлектрических структур.

Специфика исследований взаимодействия электромагнитного излучения в видимом диапазоне длин волн (405 – 909 нм) с рассматриваемыми наноразмерными структурами заключалась в принципиально различающихся свойствах объектов взаимодействия. Взаимодействие электромагнитных волн, микро- и нанометровом диапазоне, исследованы с тонкоплёночными образцами металлических, полупроводниковых структур на основе кремния и углерода, органических полупроводниковых материалов.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов, изложенных в диссертации, определяется хорошей апробацией и цитируемостью работ автора, выдержанных временем, а также его опытом по проведению научно-исследовательских работах. Стоит отметить и множество конференций с широкой географией, в которых автор участвовал. В диссертации обосновано использование волноводных методов исследований и методов свободного пространства, позволяющих достаточно точно определять относительные мощности отражённой, прошедшей и поглощенной волн в долях падающей волны. Обоснованность и доказанность выводов представленной работы определяется непротиворечивостью экспериментальных результатов и теоретических расчётов, использованием широкого комплекса современных рентгеновских, электронных и оптических методов исследования микро- и наноструктур.

В качестве вопросов и замечаний, стоит выделить следующее:

- Каким образом проводился рентгенофазовый анализ изатинов? Встречаются ли другие полиморфные модификации этих соединений? В работе приведены результаты исследований только для одной или смеси поликристаллических модификаций этих соединений?

- В какой степени природа металла и средняя шероховатость используемых в работе подложек влияет на структуру, морфологию и электрофизические свойства тонких металлических плёнок?

- Известный факт, что удельная тепловая мощность, выделяемая в проводнике, пропорциональна квадрату плотности тока. Если при исследовании зависимости температуры металла на диэлектрике от времени воздействия постоянного тока для разных толщин пленок алюминия плотность тока имела одинаковое численное значение, то как можно объяснить возрастание тепловыделения с увеличением толщины плёнки?

- На каких расчётных и экспериментальных данных построена зонная диаграмма гетероструктуры Al-C₆₀-IMPH-ITO? Каков основной механизм токопереноса в гетероструктуре и на каком основании было сделано предположение, что вид экспериментальной ВАХ обусловлен потенциальным барьером именно на границе раздела IMPH-C₆₀?

- Чем можно объяснить расхождение численных значений оптической (1,5 эВ) (рис. 4.6) и термической (0,3 эВ) (рис. 4.31) ширины запрещённой зоны аморфного гидрогенизированного кремния?

- Низкое качество оформления некоторых рисунков (1.14, 1.16, 4.36, 5.8) затрудняет чтение диссертационной работы. Кроме того, в тексте диссертации встречаются неточные термины, например: квазикристаллический, псевдопериодический, некристаллический, атомная решетка аморфна или аморфная решётка, полупроводниковые слои в тонкоплёночных приборах в большинстве своём аморфны.

Заключение

Таким образом, можно сделать заключение, что представленная диссертация является полноценным разносторонним исследованием на современную и актуальную тему, охватывающую в равной степени направление радиофизики и физики полупроводников и полностью соответствует специальностям 1.3.4 – радиофизика и 1.3.11 – физика полупроводников. Отмеченные замечания и вопросы не снижают научной и практической значимости полученных результатов и общую положительную оценку работы. Автореферат дает полную картину о проведенных исследованиях и общем объеме выполненных теоретических и экспериментальных изысканий. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, в том числе входящих в список изданий, рекомендованных ВАК.

Работа, выполненная на тему «Особенности взаимодействия электромагнитных волн с проводящими и полупроводниковыми наноструктурированными средами», по своей новизне и актуальности, совокупности полученных результатов и их достоверности, отвечает требованиям п. 9 - 14 действующего «Положения о присуждении ученых

степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а соискатель Мазинов Алим Сеит-Аметович, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальностям 1.3.4 – радиофизика и 1.3.11 – физика полупроводников.

Официальный оппонент – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики, теплотехники и теплоэнергетики ФГБОУ ВО «ВГУИТ»

 /Котов Геннадий Иванович/

« 25 » апреля 2022 г.

Адрес: 394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19, факультет ПМА, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики.
Тел.: +7 (905)654-92-00. Эл. почта: giktv@mail.ru

