

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

**АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР С ПРОВОДЯЩИМИ
НАНОВКЛЮЧЕНИЯМИ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 201 группы

по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
факультета нано- и биомедицинских технологий
Моревой Анастасии Игоревны

Научные руководители

профессор, д.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч.
звание

подпись, дата

Ал. В. Скрипаль

инициалы, фамилия

доцент, к.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч.
звание

подпись, дата

Д.В. Пономарев

инициалы, фамилия

И.о. зав. кафедрой

профессор, д.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч.
звание

подпись, дата

Ал. В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2019

Введение. Эффективность производства существующих и успешное создание новых приборов твердотельной микро- и наноэлектроники во многом зависит от уровня развития технологии изготовления слоев различных материалов толщиной от нескольких нанометров до десятков микрометров. Достижение Слоистые структуры высокой степени совершенства и, в частности, структуры, включающие нанометровые металлические, полупроводниковые и диэлектрические пленки, успешно применяются в микро-, нано-, акусто-, СВЧ- и оптоэлектронике.

Использование полупроводниковых и диэлектрических структур с нанометровыми металлическими слоями позволяет регулировать коэффициент отражения электромагнитного излучения в широком частотном диапазоне. При этом величина коэффициента отражения определяется толщиной и электропроводностью проводящего слоя, нанесенного на изолирующую подложку. Однако для изменения толщины и электропроводности проводящего слоя необходимо, как правило, вносить определенные коррективы в технологический процесс нанесения проводящего слоя. Другим способом управления отражательными свойствами структуры «проводящий слой–изолирующая подложка» является изменение площади проводящего покрытия на диэлектрическом основании. Изменение ориентации структуры «проводящий слой–изолирующая подложка» также приводит к изменению её отражательной способности. Следует отметить, что изменение диэлектрической проницаемости изолирующей подложки позволяет существенно изменить отражающую способность исследуемой структуры без изменения параметров проводящего слоя, при этом изменение диэлектрической проницаемости подложки может быть достигнуто созданием в ней воздушных включений заданного размера, распределенных по площади подложки.

Целью работы являлось исследование амплитудно-частотных характеристик металлодиэлектрических структур с проводящими нановключениями в СВЧ-диапазоне.

Для достижения этой цели:

- С использованием системы автоматизированного проектирования High Frequency Structural Simulator (HFSS) выполнено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик металлодиэлектрических структур с проводящими нановключениями в СВЧ-диапазоне.
- проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик металлодиэлектрических структур с проводящими нановключениями в СВЧ-диапазоне.

Дипломная работа занимает 45 страницу, имеет 28 рисунок.

Обзор составлен по 20 информационным источникам.

Во введение рассматривается актуальность работы, устанавливается цель и выдвигаются задачи для достижения поставленной цели.

Первый раздел представляет собой анализ современного состояния исследований электродинамических характеристик металлодиэлектрических структур с проводящими нановключениями в СВЧ-диапазоне.

Во втором разделе работы представлено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик металлодиэлектрических структур с проводящими нановключениями в СВЧ-диапазоне. Он включает в себя такие подразделы, модель для расчета электродинамических характеристик поперечных слоистых металлодиэлектрических структур в СВЧ-диапазоне, математическая модель для расчета электродинамических характеристик металлодиэлектрической структуры при наличии проводящего включения в виде нанометровой металлической пленки, полностью заполняющей поперечное сечение волновода, моделирование амплитудно-частотных характеристик слоистой структуры, при наличии проводящего включения в виде нанометровой металлической пленки, полностью заполняющей поперечное сечение волновода, результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик слоистой структуры, при наличии проводящего включения в виде нанометровой металлической пленки, полностью заполняющей поперечное сечение волновода, математическая модель для расчета электродинамических характеристик металлодиэлектрической структуры при наличии проводящего включения в виде нанометровой металлической пленки, частично заполняющей поперечное сечение волновода, электродинамическая модель слоистой структуры, при наличии проводящего включения в виде нанометровой металлической пленки, частично заполняющей поперечное сечение волновода, результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик слоистой структуры на основе трехмерного

электродинамического моделирования, при наличии проводящего включения в виде нанометровой металлической пленки, частично заполняющей поперечное сечение волновода, модель для расчета электродинамических характеристик продольных слоистых металлодиэлектрических структур в СВЧ-диапазоне, математическая модель для расчета электродинамических характеристик продольной слоистой металлодиэлектрической структуры при наличии проводящего включения в виде сплошной нанометровой металлической пленки, результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик продольной слоистой металлодиэлектрической структуры при наличии проводящего включения в виде сплошной нанометровой металлической пленки.

В третьем разделе работы представлены экспериментальные исследования амплитудно-частотных характеристик металлодиэлектрических структур с проводящими нановключениями в СВЧ-диапазоне. Он включает в себя такие подразделы:

Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик слоистой структуры, при наличии проводящего включения в виде нанометровой металлической пленки, полностью или частично заполняющей поперечное сечение волновода. Экспериментально были измерены АЧХ коэффициента прохождения и отражения для металлического напыления, которое было разделено на 15 частей с чередованием диэлектрик-металл-диэлектрик. Количество металлических полосок 7 шт. Заполняемость металлической пленкой составила 46%. Представлены АЧХ коэффициента отражения и прохождения для металлического напыления, которое было разделено на 15 частей с чередованием диэлектрик-металл-диэлектрик. Также были измерены АЧХ прохождения и отражения для металлического напыления, которое было разделено на 15 частей с чередованием металл-диэлектрик-металл, диэлектрик-диэлектрик-металл, металл-металл-диэлектрик. Представлены АЧХ коэффициента отражения и прохождения для металлического напыления, которое было разделено на 15 частей с

чередованием металл- диэлектрик-металл. Количество металлических полосок 8 шт. Заполняемость металлической пленкой составила 53%, АЧХ коэффициента отражения и прохождения для металлического напыления, которое было разделено на 15 частей с чередованием диэлектрик-диэлектрик-металл. Количество металлических полосок 5 шт. Заполняемость металлической пленкой составила 33%, АЧХ коэффициента отражения и прохождения для металлического напыления, которое было разделено на 15 частей с чередованием металл- металл-диэлектрик. Количество металлических полосок 10 шт. Заполняемость металлической пленкой составила 66%.

Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик продольной слоистой металлодиэлектрической структуры при наличии проводящего включения в виде сплошной нанометровой металлической пленки

Измерены экспериментально АЧХ коэффициента отражения и прохождения для поликора с металлическим напылением толщиной 11микрон (рис.26). Толщины подложки: 0.5мм, 1мм, 1.5мм, 2мм, 3мм.

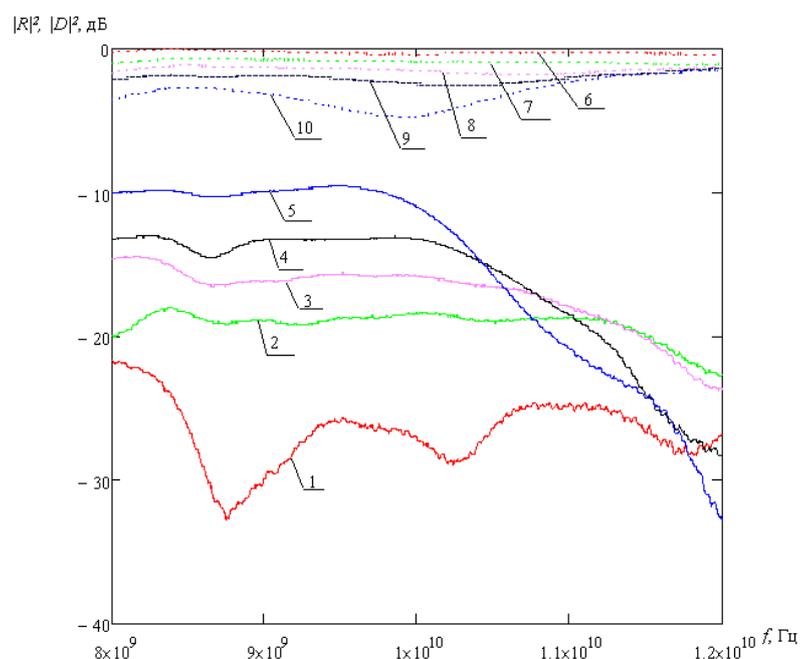


Рис. 26 Экспериментальные АЧХ коэффициента отражения (кривые 1, 2, 3, 4, 5) и прохождения (кривые 6, 7, 8, 9, 10) для поликора с металлическим

напылением. Толщины подложки: 0.5мм (кривые 1, 6), 1мм (кривые 2, 7), 1.5мм (кривые 3, 8), 2мм (кривые 4, 9), 3мм (кривые 5, 10)

Измерены АЧХ коэффициента отражения и прохождения для поликора с металлическим напылением $R=12 \text{ Ом}/\square$ (рис.27) и $R=4 \text{ Ом}/\square$ (рис.28). Толщины подложки: 0.5мм, 1мм, 1.5мм, 2мм, 3мм.

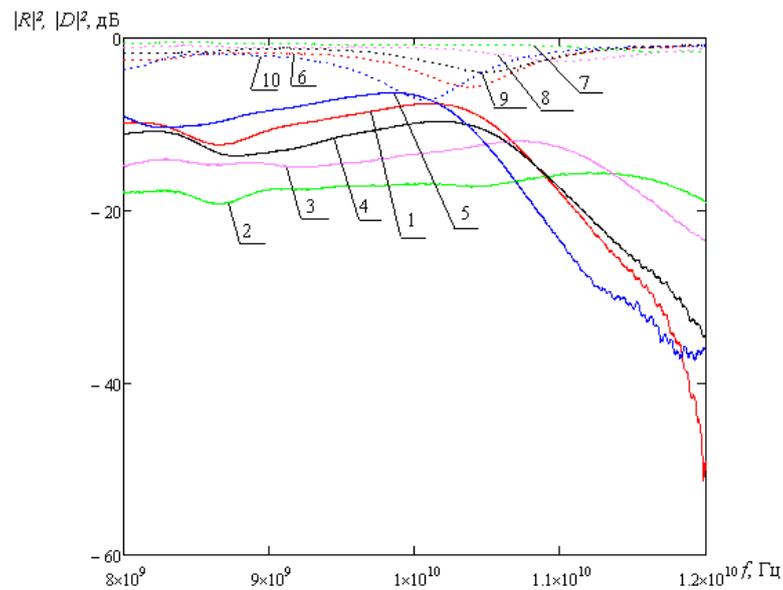


Рис. 27 Экспериментальные АЧХ коэффициента отражения (кривые 1, 2, 3, 4, 5) и прохождения (кривые 6, 7, 8, 9, 10) для поликора с металлическим напылением. Толщины подложки: 0.5мм (кривые 1, 6), 1мм (кривые 2, 7), 1.5мм (кривые 3, 8), 2мм (кривые 4, 9), 3мм (кривые 5, 10). Поверхностное сопротивление $R=12 \text{ Ом}/\square$

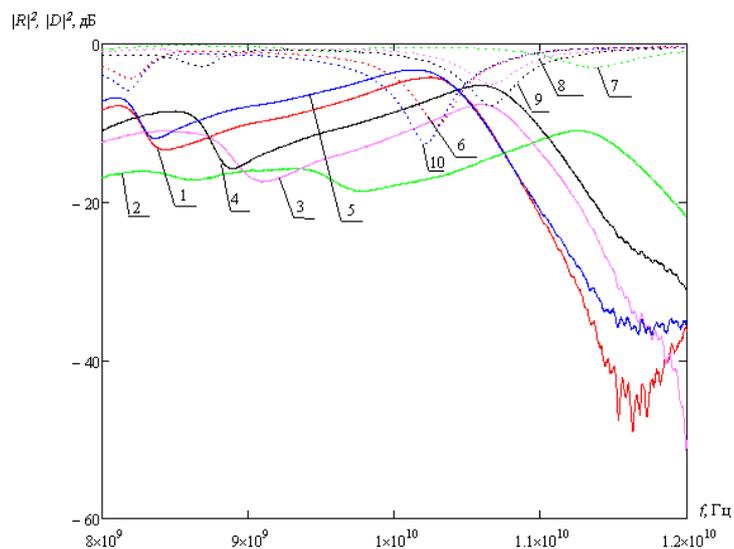


Рис. 28 Экспериментальные АЧХ коэффициента отражения (кривые 1, 2, 3, 4, 5) и прохождения (кривые 6, 7, 8, 9, 10) для поликора с металлическим напылением. Толщины подложки: 0.5мм (кривые 1, 6), 1мм (кривые 2, 7), 1.5мм (кривые 3, 8), 2мм (кривые 4, 9), 3мм (кривые 5, 10). Поверхностное сопротивление $R=4 \text{ Ом}/\square$

Таким образом, уменьшение площадь металлизации эквивалентно уменьшению толщины пленки. Для получения одинаковых коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с нанометровой металлической пленкой, нанесенной на диэлектрическую подложку, могут использоваться как сплошные металлические пленки, так и пленки, частично заполняющие поверхность диэлектрической пластины, но большей толщины.

Заключение.

- Построена математическая модель для расчета электродинамических характеристик металлодиэлектрической структуры при наличии проводящего включения в виде нанометровой металлической пленки, полностью заполняющей поперечное сечение волновода
- Построена электродинамическая модель слоистой структуры, при наличии проводящего включения в виде нанометровой металлической пленки, частично заполняющей поперечное сечение волновода
- С использованием системы автоматизированного проектирования HFSS выполнено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик слоистых структур при наличии проводящего включения в виде нанометровой металлической пленки, частично заполняющей поперечное сечение волновода
- Показано теоретически и подтверждено экспериментально, что для получения заданных значений коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с нанометровой металлической пленкой, нанесенной на диэлектрическую подложку, могут использоваться как сплошные металлические пленки, так и металлические пленки, частично заполняющие поверхность диэлектрической пластины, но большей толщины, при этом сама диэлектрическая пластина может быть выполнена в виде композитного материала.
- Выполнено компьютерное моделирование и экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик продольной слоистой металлодиэлектрической структуры при наличии проводящего включения в виде сплошной нанометровой

металлической пленки.

- Установлено изменение характера частотной зависимости коэффициента прохождения электромагнитной волны с слоистой продольно расположенной металлодиэлектрической структуры с ростом толщины и электропроводности проводящего слоя.

Список литературы

1. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Бокуи Али. Измерение параметров нанометровых пленок оптическими и радиоволновыми методами// Известия вузов. Электроника. 2010. №3. С. 44–50
2. Гроссе П. Свободные электроны в твердых телах. М.: Мир, 1982. 270 с. (P. Grosse Freie Elektronen in Festkörpern, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1979.)
3. Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Семёнов А.А., Абрамов А.В., Голишников А.А. Радиоволновые и оптические измерения толщины и электропроводности металлических пленок на полупроводниковых и диэлектрических подложках// Известия вузов. Электроника. 2005. №1. С. 68–77
4. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Изменение типа резонансного отражения электромагнитного излучения в структурах нанометровая металлическая пленка – диэлектрик// Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 2, с. 13–22
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
6. Метфессель С. Тонкие пленки, их изготовление и измерение. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. 272 с.
7. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Особенности интерференции на границе тонкая металлическая пленка—диэлектрическое основание// Журнал технической физики. 1994. Т.64, №5. С. 72–77.

8. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл–полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения// ЖТФ. 2006. Т. 76, вып. 5, с. 112–117
9. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.В. Влияние отжига на СВЧ-характеристики углеродных нанотрубок и нанокомпозитных материалов, созданных на их основе Журнал технической физики, 2014, том 84, вып. 6 с.88-91
10. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.В. Управление СВЧ-характеристиками композитных материалов с наполнителем из углеродных нанотрубок воздействием ультрафиолетового излучения Журнал технической физики, 2013, том 83, вып. 3 с.91-95
11. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.В. Комплексная диэлектрическая проницаемость композитов на основе диэлектрических матриц и входящих в их состав углеродных нанотрубок Журнал технической физики, 2011, том 81, вып. 1. с. 106-110.
12. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы наноэлектроники: учеб. пособие. - М. : Физматкнига : Логос : Унив. кн., 2006. – 494 с. Гриф УМО (В НБ СГУ 14 экз)
13. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. СПб. ; М. ; Краснодар: Изд-во Лань, 2008. 618 с. (41 экз.)
14. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твёрдого тела: учеб. для вузов - Н. Новгород: Изд-во Нижегород. ун-та, 1993. - 490 с. (В НБ СГУ 13 экз), 2000. - 496 с.
15. Барыбин А.А. Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы: учеб. пособие . - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 423 с. (В ЗНБ СГУ 5 экз), 2006

16. Коваленко А.А., Петропавловский М.Д. Основы микроэлектроники: учеб. пособие для студентов вузов – 3-е изд., стер. – М.: Изд. центр «Академия», 2010. – 238 с. Гриф УМО
17. Сушко М.Я., Криськив С.К. Метод компактных групп в теории диэлектрической проницаемости гетерогенных систем Журнал технической физики, 2009, том 79, вып. 3