

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

ИЗМЕНЕНИЕ ТИПА РЕЗОНАНСНОГО ОТРАЖЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА В  
СТРУКТУРАХ НАНОМЕТРОВАЯ МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ПЛЕНКА–  
ДИЭЛЕКТРИК

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ  
студента 4 курса  
по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»  
факультета нано- и биомедицинских технологий

Приемышева Аркадия Дмитриевича

Научные руководители

профессор, д.ф.-.м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

ст.преподаватель, к.ф.-.м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

Е.В. Латышева

\_\_\_\_\_  
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 изготовления существующих и успешное изобретение новых приборов твердотельной микро- и наноэлектроники во многом зависит от уровня развития технологии изготовления слоев различных материалов толщиной от нескольких нанометров до десятков микрометров. Современные методы молекулярно-лучевой эпитаксии позволяют создавать совершенные слои различных материалов толщиной в несколько нанометров и, в частности, металлические нанослои, нанесенные на изолирующие подложки. Применение слоистых структур на основе нанометровых металлических пленок в микро-, акусто-, СВЧ- и оптоэлектронике часто определяется способностью отражать электромагнитное излучение на различных частотах.

При измерениях чаще всего применяются контактные методы, т. е. параметры полупроводниковых и диэлектрических материалов и металлических пленок измеряют на постоянном или низкочастотном токе. Измерения такими методами производятся при наличии контакта зонда с образцом. Зачастую это приводит к разрушению исследуемого материала. При использовании таких методов могут возникать характерные для них нежелательные явления, например, связанная с контактом инжекция носителей заряда в материал, возникновение контактной разности потенциалов, термоЭДС, которые приводят к трудноустраняемым погрешностям. С помощью зондовых методов затруднительно также исследовать образцы малой площади с произвольной геометрией.

Достоинством бесконтактных методов, к которым, помимо прочих, относятся СВЧ-методы, является возможность проводить измерения, не разрушая материал и не изменяя его свойства.

Следует отметить, что СВЧ-методы являются наиболее предпочтительными при использовании исследуемых материалов и структур в приборах полупроводниковой СВЧ-электроники.

Представляет интерес реализация ситуаций, когда незначительные изменения параметров металлических нанослоев существенным образом влияют на характеристики взаимодействия электромагнитного излучения со слоистыми структурами, содержащими нанометровые металлические слои. Такая ситуация реализуется, в частности, если выполняются условия резонанса для электромагнитной волны, распространяющейся в слоистой структуре.

В настоящей работе исследовались особенности взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона со слоистыми структурами на основе тонких нанометровых металлических пленок и диэлектрических материалов в волноведущей системе, устанавливалась возможность расширения диапазона и повышения достоверности измерений параметров слоистых структур на основе тонких нанометровых металлических пленок и диэлектрических материалов по спектрам отражения и прохождения взаимодействующего с ними излучения сверхвысокочастотного диапазона и повышения чувствительности СВЧ-методов измерения. При этом высокая точность измерений достигалась лишь при условии, что известно теоретическое описание спектров отражения и прохождения, хорошо согласующееся с экспериментом, и эти спектры характеризуются высокой чувствительностью к изменению величин искомых параметров измеряемых структур.

С учетом вышесказанного была сформулирована **цель бакалаврской работы:** исследование особенностей взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона в структурах нанометровая металлическая пленка–диэлектрик, в частности изменение типа резонансного отражения.

Бакалаврская работа содержит 4 главы:

1. ВОЛНОВОДНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ И МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА СВЧ

*1.1 Узлы, входящие в измерительные СВЧ схемы*

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЛНОВОДНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ СТРУКТУР ПО СПЕКТРАМ ОТРАЖЕНИЯ И ПРОХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*2.1 Математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными структурами.*

*2.2 Основа математического моделирования. Метод конечных элементов.*

3. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА СО СТРУКТУРОЙ МЕТАЛЛ - ДИЭЛЕКТРИК.

*3.1 Результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения*

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ СО СТРУКТУРОЙ МЕТАЛЛ - ДИЭЛЕКТРИК.

1. ВОЛНОВОДНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ И МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА СВЧ

Наиболее распространенными методами являются волноводные и резонаторные. При использовании волноводных методов рассматривается взаимодействие СВЧ-волны, распространяющейся в волноводе, с помещенным в него образцом, и измеряются интенсивность прошедшей и отраженной волн. При измерениях резонансными методами схема настраивается в резонанс изменением размеров электродинамической системы или частоты генератора. Эти методы основаны на поглощении электромагнитной энергии свободными носителями заряда и изменении эквивалентных размеров резонатора при помещении в него полупроводника.

Обычно волноводные методы основаны на измерении комплексного коэффициента отражения  $R$  или прохождения  $D$  отрезка волновода с

образцом и определении электрофизических параметров полупроводника по формулам, связывающим их с  $R$  и  $D$ .

$$R = \frac{\gamma_0^2 - \gamma^2 \operatorname{sh} \gamma l}{\gamma^2 + \gamma_0^2 \operatorname{sh} \gamma l + 2\gamma\gamma_0 \operatorname{ch} \gamma l}$$

$$D = \frac{2\gamma\gamma_0}{\gamma^2 + \gamma_0^2 \operatorname{sh} \gamma l + 2\gamma\gamma_0 \operatorname{ch} \gamma l}$$

где  $\gamma$  и  $\gamma_0$  – постоянные распространения электромагнитной волны в заполненном и пустом волноводе.

Анализируя существующие волноводные методы измерения электрофизических параметров полупроводниковых и диэлектрических структур можно сделать вывод, что разработанные к настоящему времени методы измерений характеризуются значительным многообразием и обеспечивают возможность определения ряда параметров металлических пленок, полупроводниковых и диэлектрических материалов и структур.

### *1.1 Узлы, входящие в измерительные СВЧ схемы*

Для плавного изменения вносимого затухания от минимального до максимального значений используются устройства, называемые переменными аттенюаторами. В измерительной технике обычно используются аттенюаторы поглощающего типа. Поглощающий волноводный аттенюатор представляет собой отрезок волновода, в Е-плоскости волны основного типа которого расположена диэлектрическая пластина с нанесенным на нее поглощающим слоем, выполненная с возможностью перемещения в направлении от узких стенок к центру и наоборот.

Для полного поглощения без отражения и излучения в окружающую среду энергии распространяющейся в волноводе волны используются согласованные нагрузки. Волноводные согласованные нагрузки

конструктивно представляют собой отрезок волновода, внутри которого помещена поглощающая вставка, имеющая для уменьшения отражения форму клина.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЛНОВОДНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ СТРУКТУР ПО СПЕКТРАМ ОТРАЖЕНИЯ И ПРОХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

### *2.1 Математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными структурами.*

Для теоретического описания взаимодействия электромагнитного излучения с периодическими структурами подобного рода применяются матричные методы и численные методы электродинамического моделирования.

Для расчета коэффициентов отражения и пропускания ЭМВ при её нормальном падении на многослойную структуру, в которой плоскости слоёв расположены перпендикулярно направлению распространения излучения и полностью заполняющие волновод по поперечному сечению, можно воспользоваться матрицей передачи волны между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны  $\gamma_j$  и  $\gamma_{j+1}$ .

Коэффициенты  $A_{N+1}$  и  $B_0$ , определяющие амплитуды волны, прошедшей через многослойную структуру, и волны, отраженной от нее, связаны с коэффициентом  $A_0$ , определяющим амплитуду падающей волны, следующим соотношением:

$$\begin{pmatrix} A_{N+1} \\ 0 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_N \cdot \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix}, \quad (2.1)$$

где:

$$\mathbf{T}_N = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_N \begin{bmatrix} 1 \\ \end{bmatrix} & \mathbf{T}_N \begin{bmatrix} 2 \\ \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_N \begin{bmatrix} 1 \\ \end{bmatrix} & \mathbf{T}_N \begin{bmatrix} 2 \\ \end{bmatrix} \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 \mathbf{T}_{j, \varphi_{j+1}} = \mathbf{T}(z_{N,N+1}) \cdot \mathbf{T}(z_{N-1,N}) \dots \mathbf{T}(z_{1,2}) \cdot \mathbf{T}(z_{0,1}) \quad (2.2)$$

матрица передачи слоистой структуры, состоящей из  $N$  слоев.

Коэффициенты отражения — и прохождения — электромагнитной волны, взаимодействующей со структурой, определяются через элементы матрицы передачи  $\mathbf{T}_N$  с помощью соотношения (2.1), получим:

$$R = -\frac{\mathbf{T}_N \begin{bmatrix} 1 \\ \end{bmatrix}}{\mathbf{T}_N \begin{bmatrix} 2 \\ \end{bmatrix}}, \quad (2.3)$$

$$D = \frac{\mathbf{T}_N \begin{bmatrix} 1 \\ \end{bmatrix} \cdot \mathbf{T}_N \begin{bmatrix} 2 \\ \end{bmatrix} - \mathbf{T}_N \begin{bmatrix} 2 \\ \end{bmatrix} \cdot \mathbf{T}_N \begin{bmatrix} 1 \\ \end{bmatrix}}{\mathbf{T}_N \begin{bmatrix} 2 \\ \end{bmatrix}} \quad (2.4)$$

Полученные соотношения могут быть использованы для нахождения значений коэффициентов отражения и прохождения при взаимодействии электромагнитной волны со слоями диэлектрика и с многослойными структурами.

Таким образом, показана теоретическая модель, позволяющая рассчитывать коэффициенты отражения и прохождения СВЧ-излучения для многослойных структур, содержащих тонкие нанометровые металлические слои.

## 2.2 Основа математического моделирования. Метод конечных элементов.

Для математического моделирования спектров отражения и прохождения СВЧ-излучения и оптимизации геометрических и электрофизических параметров его слоев использовалось программное обеспечение *ANSYS HFSS*, реализующее метод конечных элементов для решения задач электродинамики.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА СО СТРУКТУРОЙ МЕТАЛЛ - ДИЭЛЕКТРИК.

#### 3.1 *Результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения*

В настоящей работе исследовалась структура металлическая пленка - диэлектрик, состоящая из слоя фторопласта толщиной 20.8 мм с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon=2$ , слоя поликора толщиной 5 мм с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon=9.6$  и слоя металлической пленки толщиной 260 нм, нанесенного полосками шириной 1 мм, в диапазоне 8-12 ГГц. Количество полосок варьировалось от 0 до 13. Слои полностью заполняли поперечное сечение волновода. Геометрические размеры и электрофизические параметры слоёв были подобраны таким образом, чтобы образующиеся запрещенные зоны перекрывали значительную часть используемого частотного диапазона 8–12 ГГц.

Рассчитанные методом конечных элементов частотные зависимости квадратов модулей коэффициента отражения  $|R|^2$  электромагнитной волны от исследуемой структуры носят ярко выраженный немонотонный характер. Имеется область резонансного отражения, которая определяется параметрами слоя диэлектрика, количеством и толщиной полос металлического слоя.

В отсутствие металлической пленки пик коэффициента отражения находится на частоте 10.3 ГГц. При внесении в данную структура металлической пленки в количестве одного столбика, коэффициент отражения смещается в сторону низких частот. При увеличении количества столбиков, коэффициент отражения смещается в высокочастотную область. Также при увеличении количества столбиков металлической пленки, пик поднимается по шкале дБ.



Добротность резонатора, образованного структурой нанометровая металлическая пленка–диэлектрик, в СВЧ-диапазоне немонотонным образом зависит от толщины и электропроводности нанометрового металлического слоя..

Полученные расчетные данные, свидетельствуют о возможности использования спектров отражения и прохождения при возникновении полуволнового резонанса в СВЧ-диапазоне для измерения параметров нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку полосками с известной шириной.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ СО СТРУКТУРОЙ МЕТАЛЛ - ДИЭЛЕКТРИК.

В настоящей работе было проведено экспериментальное исследование взаимодействия СВЧ- излучения со структурой металл - диэлектрик. Экспериментально исследовалась структура, созданная в соответствии с описанной моделью в пункте 3.1. Измерение амплитудно-частотных характеристик коэффициентов отражения и пропускания исследуемого образца в трехсантиметровом диапазоне длин волн проводилось с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5242A.

В ходе экспериментальных исследований в диапазоне частот 8–12 ГГц измерен спектр отражения электромагнитной волны, взаимодействующей с изображенной на рис.3 структурой. Измеряемая структура помещалась в прямоугольный волновод и полностью заполняла его по поперечному сечению.

В соответствии с пунктами 3 и 4, схожие показатели изменения резонанса в теоретической и экспериментальной модели, образованной структурой нанометровая металлическая пленка–диэлектрик, в СВЧ-

диапазоне, удалось достичь при толщине металлической пленки равной 260 нм.

В ходе настоящей бакалаврской работы было проведено исследование особенностей взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона в структурах нанометровая металлическая пленка–диэлектрик:

1. Построена модель многослойной структуры, содержащей нанометровые металлические слои, нанесенные в виде полос на диэлектрическую подложку, для расчета спектров отражения и прохождения СВЧ-излучения с использованием программного обеспечения ANSYS HFSS.

2. Получены расчетные и экспериментальные данные, свидетельствующие о возможности использования спектров отражения и прохождения, при возникновении полуволнового резонанса, для измерения параметров нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку полосками.

3. Показано, что с ростом толщины металлической пленки в слоистой структуре диэлектрик-металл изменяется тип резонанса при отражении электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего со слоистой структурой;