

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и информатизации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

д.б.н. В.Н. Попов

« 11 » октября 2016 г.



### Отзыв

ведущей организации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» на диссертацию Латышевой Екатерины Викторовны «Резонансные СВЧ-методы многопараметровых измерений эпитаксиальных полупроводниковых структур с нанометровыми металлическими слоями», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – Радиофизика и 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

К одному из важнейших научных направлений в радиофизике и твердотельной электронике относится совершенствование СВЧ-методов контроля электрофизических параметров материалов и структур, применяемых при производстве современных устройств микро- и наноэлектроники.

Возможность высокоточного измерения электрофизических параметров металлических пленок, диэлектрических и полупроводниковых материалов и структур во многом определяет технологический уровень производства приборов твердотельной микро- и наноэлектроники.

Несмотря на огромное число публикаций, посвящённых проблеме одновременного определения двух и более параметров полупроводниковых и металлодиэлектрических структур с использованием спектров отражения и прохождения СВЧ-излучения, эта проблема остается нерешённой, так как существуют комбинации электрофизических параметров и толщин слоев полупроводниковых структур, приводящих к идентичным спектрам отражения и прохождения.

Одним из способов решения проблемы многопараметровых измерений является использование электродинамических систем, обладающих высокоселективными частотными характеристиками коэффициентов отражения и прохождения, проведение измерений на современном оборудовании, с большим динамическим диапазоном измеряемых СВЧ-характеристик, и применение современных численных методов для описания характеристик взаимодействия электромагнитного излучения с исследуемыми структурами, обеспечивающих однозначное решение обратной задачи.

СВЧ-методы измерения остаются в настоящее время наиболее предпочтительными для определения параметров материалов и структур, используемых при создании приборов СВЧ-электроники, так как информация, полученная с помощью низкочастотных методов, при переходе в СВЧ-диапазон может оказаться недостаточной для конструирования СВЧ-устройств с заданными характеристиками.

В качестве электродинамической системы, обладающей высокоселективной резонансной особенностью, могут быть использованы одномерные волноводные СВЧ фотонные кристаллы, характеризующиеся наличием запрещенных и разрешенных зон в спектре выходного сигнала. Резонансная особенность, называемая примесной модой колебаний, может проявляться в фотонной запрещенной зоне при наличии дефекта в структурах с пространственной периодичностью.

Создание СВЧ-схемы с высокоселективной резонансной особенностью, характеризующейся высокой чувствительностью к изменению параметров нанометровых металлических пленок на диэлектрической подложке, возможно при возбуждении в электродинамической системе волн высших типов, которые обеспечивают возникновение волноводно-диэлектрического резонанса.

В связи с этим тема диссертационной работы Латышевой Е.В., посвящённой поиску новых резонансных СВЧ-методов многопараметровых измерений эпитаксиальных полупроводниковых структур с нанометровыми ме-

таллическими слоями, основанных на использовании новых типов резонансных СВЧ-систем является актуальной для радиофизики и твердотельной электроники.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы. Диссертационная работа изложена на 127 страницах, содержит 38 рисунков и список литературы из 183 наименований. Работа по структуре и объему соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Актуальность исследований, новизна решаемых в диссертации задач, их практическая ценность следуют из проведенного ее автором в *первом разделе* критического анализа исследований по рассматриваемому направлению.

Задачи, решаемые автором в ходе выполнения диссертационной работы, относятся к стыку научных направлений радиофизики и твердотельной электроники.

*Во втором разделе* предложено теоретическое обоснование методов многопараметровых измерений параметров полупроводниковых слоистых структур на СВЧ по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с одномерными волноводными фотонными кристаллами.

Для расчета коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны при её нормальном падении на многослойную структуру с плоскостями слоёв, перпендикулярными направлению распространения излучения и полностью заполняющими волновод по поперечному сечению, используется матрица передачи волны между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны.

При компьютерном моделировании процедуры измерения параметров полупроводниковых слоистых структур на СВЧ рассматривался одномерный волноводный фотонный кристалл, составленный из одиннадцати слоев, кото-



рые образуют структуру из периодически повторяющихся элементов, каждый из которых включает в себя два слоя.

Решены задачи одновременного измерения:

- удельной электропроводности полупроводниковой подложки, толщины и удельной электропроводности сильнолегированного эпитаксиального слоя в полупроводниковых  $n^+ - n$ -структурах;
- толщины подложки полупроводниковой структуры, толщины и удельной электропроводности сильнолегированного эпитаксиального слоя в полупроводниковых  $n^+ - n$ -структурах и в структурах с полуизолирующей подложкой.

Поиск искомых параметров исследуемых структур, выполняющих роль нарушения периодичности в одномерном волноводном СВЧ фотонном кристалле, проводился на основе решения обратной задачи методом наименьших квадратов с использованием спектров отражения и прохождения.

Решена задача измерения четвертого параметра полупроводниковой структуры – подвижности свободных носителей заряда в сильнолегированном эпитаксиальном слое с использованием разработанного модифицированного метода СВЧ-магнитосопротивления с учетом отражения СВЧ-волны от переднего торца пластины.

*В третьем разделе* приведены результаты экспериментального определения параметров эпитаксиальных полупроводниковых структур: толщины полупроводниковой подложки, толщины и удельной электропроводности сильнолегированного эпитаксиального полупроводникового слоя и подвижности свободных носителей заряда в нем в результате решения обратных задач с использованием частотных зависимостей коэффициентов прохождения и отражения электромагнитной волны СВЧ-диапазона, взаимодействующей с одномерным волноводным фотонным кристаллом, содержащим в качестве неоднородности исследуемые полупроводниковые структуры.

В качестве исследуемого образца была выбрана эпитаксиальная арсенид-галлиевая структура, состоящая из высокоомной подложки толщиной  $t_{\text{под}} = 480.3$  мкм и сильнолегированного эпитаксиального слоя, толщина  $t_{\text{n}}$  которого составляла 13.14 мкм, электропроводность  $\sigma_{\text{n}} = 71.73 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ .

Для определения подвижности свободных носителей заряда  $\mu$  полупроводниковых сильнолегированных слоев эпитаксиальная полупроводниковая структура размещалась в  $E$ -плоскости в центре поперечного сечения прямоугольного волновода после волноводного фотонного кристалла. Вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  магнитного поля был направлен перпендикулярно узким стенкам волновода.

Искомые значения подвижности для структур с толщинами сильнолегированных полупроводниковых слоев  $t_{\text{n}} = 2.17$  мкм и  $t_{\text{n}} = 13.14$  мкм определялись численным методом в результате решения обратной задачи с использованием метода наименьших квадратов и составили  $0.591 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  и  $0.72 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , соответственно. При этом учет отражения СВЧ-волны от переднего торца измеряемой структуры, позволил уменьшить погрешность измерения подвижности свободных носителей заряда в сильнолегированном эпитаксиальном слое полупроводниковой структуры толщиной  $t_{\text{n}} = 2.17$  мкм с  $\pm 22.7\%$  до  $\pm 5.0\%$  и в слое толщиной  $t_{\text{n}} = 13.14$  мкм с  $\pm 4.49\%$  до  $\pm 0.7\%$ .

**В четвертом разделе** представлены результаты компьютерного моделирования взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с металлодиэлектрической структурой в условиях возникновения волноводно-диэлектрического резонанса при частичном заполнении исследуемой структурой поперечного сечения волновода и при размещении исследуемой структуры перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода симметрично относительно его продольной оси.

Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик в системе с нанометровым металлическим слоем на диэлектрической подложке при возникновении волноводно-диэлектрического резонанса было выполне-

но при помощи системы электродинамического моделирования и проектирования HFSS (High Frequency Structure Simulator).

Теоретически установлен эффект резонансного поглощения мощности СВЧ-излучения в нанометровом слое металла при возникновении в электродинамической системе волноводно-диэлектрического резонанса в случае размещения металлодиэлектрической структуры в волноводе под углом к его узким стенкам симметрично относительно продольной оси волновода.

Обоснована теоретически и установлена экспериментально высокая чувствительность частотных зависимостей коэффициента прохождения электромагнитной волны к изменению толщины нанометрового металлического слоя, входящего в состав металлодиэлектрической структуры, значение которой для диапазона толщин слоя от 0 до 1.0 нм достигает 36.8 дБ/нм.

Приведены результаты экспериментального обоснования возможности использования волноводно-диэлектрического резонанса для разработки методов измерения параметров нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку, при частичном заполнении исследуемой структурой поперечного сечения волновода и при размещении исследуемой структуры перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода симметрично относительно его продольной оси.

***В заключении*** приведены основные результаты и сформулированы выводы диссертационной работы.

Не вызывает сомнения научная новизна, обоснованность и значимость полученных диссертантом результатов. К наиболее *значимым новым научным результатам*, полученным автором, можно отнести:

- теоретическое обоснование возможности решения проблемы многопараметровых измерений полупроводниковых и металлодиэлектрических структур на СВЧ по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения;

- теоретическое описание эффекта резонансного поглощения мощности СВЧ-излучения при размещении металлodieлектрической структуры с нанометровым слоем металла толщиной менее 7.0 нм в волноводе под углом к его узким стенкам;
- теоретическое обоснование возможности использования высокоселективных резонансов, возникающих в электродинамической системе при возбуждении волн высших типов, для контроля параметров нанометровых металлических пленок на dieлектрической подложке.

*Основная практическая значимость результатов*, изложенных в диссертации, связана с практической реализацией:

методов одновременного измерения толщины и удельной электропроводности слоев в полупроводниковых  $n^+n$ -структурах и в структурах с полуизолирующей подложкой, выполняющих роль нарушения периодичности в одномерном волноводном фотонном кристалле, по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения;

модифицированного метода СВЧ-магнитосопротивления для измерения подвижности свободных носителей заряда в сильнолегированном эпитаксиальном слое полупроводниковой структуры, при её размещении после фотонного кристалла в центре поперечного сечения прямоугольного волновода, с использованием частотных зависимостей коэффициентов прохождения и отражения, измеренных при воздействии магнитного поля и в его отсутствии;

метода измерения параметров нанометровых металлических слоев, нанесенных на керамическую подложку, с использованием волноводно-dieлектрического резонанса.

*Достоверность результатов диссертации* обеспечивается качественным и количественным соответствием выводов теории основным результатам, полученным экспериментально, строгостью используемых математических моделей, корректностью упрощающих допущений. Достоверность экспери-

ментальных результатов обеспечена применением стандартной измерительной аппаратуры, обработкой экспериментальных данных с использованием стандартных методов.

Работа не лишена отдельных недостатков:

1. Не обсужден вопрос возможности одновременного измерения не трех, а четырех параметров полупроводниковых слоистых структур с использованием одномерных волноводных фотонных кристаллов путем решения обратной задачи с использованием частотных зависимостей коэффициентов прохождения и отражения.

2. Не обсуждены диапазоны значений удельных электропроводностей и толщин, используемых при моделировании процедуры измерения параметров полупроводниковых слоистых структур на СВЧ.

3. Не выяснено влияние неоднородности электрофизических и геометрических параметров слоёв полупроводниковых и металлодиэлектрических структур на результаты многопараметровых измерений.

4. Не приведено сравнение эффекта резонансного поглощения мощности СВЧ-излучения при размещении металлодиэлектрической структуры с нанометровым слоем металла в волноводе под разными углами к его узким стенкам.

Указанные недостатки не влияют на общую высокую оценку диссертации. Полученные в ней результаты являются новыми, их использование открывает перспективу широкого применения в научных лабораториях и на производстве.

Защищаемые положения сформулированы в результате выполнения большого объема численного моделирования рассматриваемых систем и всесторонних экспериментальных исследований, что придает им высокий уровень обоснованности.

Диссертация достаточно хорошо оформлена и литературно изложена.

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.



Материалы работы изложены в 4 статьях в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, в десяти работах, опубликованных в трудах международных и Всероссийских конференций.

Результаты представленных в диссертации исследований могут быть рекомендованы к использованию *на предприятиях и в организациях электронной промышленности*: АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г. Саратов, АО «НПП «Контакт», г. Саратов, АО «НПП «Исток» им. Шокина» г. Фрязино, Московская область, АО «Центральный НИИ измерительной аппаратуры» г. Саратов, *институтах Российской Академии Наук*: СФ ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН» г. Саратов, Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН» г. Фрязино, Московская область, *в высших учебных заведениях Министерства образования и науки Российской Федерации*: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ««Московский институт электронной техники»» г. Зеленоград, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» г. С. Петербург, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» г. Самара, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Институт Нанотехнологий, Электроники и Приборостроения Южного Федерального университета, г. Таганрог.

Характеризуя диссертацию в целом, следует отметить, что работа Латышевой Е.В. является законченным научным исследованием. Совокупность научных результатов, изложенных в диссертации, можно квалифицировать как решение задачи, имеющей существенное значение для радиофизики и твердотельной электроники, связанной с разработкой и реализацией резо-

нансных СВЧ-методов многопараметровых измерений эпитаксиальных полупроводниковых структур с нанометровыми металлическими слоями.

Можно заключить, что диссертационная работа Латышевой Е.В. «Резонансные СВЧ-методы многопараметровых измерений эпитаксиальных полупроводниковых структур с нанометровыми металлическими слоями» соответствует критериям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор диссертации Латышева Екатерина Викторовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – Радиофизика и 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Отзыв заслушан и одобрен на заседании кафедры электроники ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» протокол №7 от 20.10.2016г.

**Отзыв составили:**

Заведующий кафедрой электроники Воронежского государственного университета, д.ф.-м.н, профессор



Бобрешов Анатолий Михайлович

д.ф.-м.н, профессор

Почтовый адрес: 394006, г. Воронеж, Университетская площадь, 1;

Телефоны: +7 (473) 228-11-60 (1800); +7 (473) 220-83-94;

e-mail: bobreshov@phys.vsu.ru



федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВГУ»)	
Подпись	<i>Бобрешов А.М.</i>
заверяю	<i>Бер. документ</i>
	<i>Синькина</i> 25.10.2016
	<small>подпись, расшифровка подписи</small>