

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию

Латышевой Екатерины Викторовны

**«Резонансные СВЧ-методы многопараметровых измерений
эпитаксиальных полупроводниковых структур с нанометровыми
металлическими слоями»,**

представленную 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

На современном этапе развития твердотельной электроники одним из важнейших направлений исследований является разработка высокочувствительных методов многопараметрового контроля электрофизических характеристик слоёв реальных нанометровых полупроводниковых и металлодиэлектрических структур.

При конструировании СВЧ-устройств наиболее предпочтительными для определения электрофизических параметров материалов и структур являются СВЧ-методы, основанные на измерении характеристик распространения электромагнитного излучения в волноведущих системах при введении в них исследуемых структур, так как информация, полученная с помощью низкочастотных методов, может оказаться недостаточной для их характеристики.

Использование электродинамических систем, обладающих частотными зависимостями коэффициентов отражения и прохождения, резко изменяющимися при вариации параметров измеряемых нанометровых металлических и полупроводниковых слоев, позволяет повысить чувствительность СВЧ-методов и снять ограничение, заключающееся в существовании комбинаций электрофизических параметров и толщин слоев полупроводниковых структур, приводящих к идентичным спектрам отражения и прохождения.

К такого рода электродинамическим системам относятся одномерные волноводные СВЧ фотонные кристаллы. Наличие в структуре фотонных кристаллов неоднородностей, нарушающих их периодичность, обеспечивает реализацию высокоселективных резонансных особенностей амплитудно-частотных характеристик, называемых примесными модами колебаний.

Реализация высокодобротных резонансных особенностей амплитудно-частотных характеристик, обладающих высокой чувствительностью к вариации параметров сверхтонких проводящих пленок возможна также с использованием одиночных элементов при возбуждении в электродинамической системе волн высших типов, которые обеспечивают возникновение волноводно-диэлектрического резонанса.

В связи с этим является актуальным для радиофизики и твердотельной электроники проведение теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку методов измерений электрофизических характеристик эпитаксиальных полупроводниковых структур с нанометровыми металлическими слоями, основанных на использовании новых типов резонансных СВЧ-систем.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 127 страницах, содержит 38 рисунков и список литературы из 183 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, описана структура и объем работы.

В первом разделе диссертации проведен критический анализ современного состояния СВЧ-методов исследований характеристик материалов и структур, используемых в СВЧ-электронике. На основе проведенного анализа сформулированы задачи диссертационного исследования. Сделан вывод об актуальности поиска путей разработки новых методов, обладающих повышенной чувствительностью к изменению параметров измеряемых образцов и позволяющих одновременно определять такие характеристики материалов и структур как, электропроводность, диэлектрическая проницаемость и толщина входящих в их состав слоев.

Во втором разделе представлена теоретическая модель, позволяющая рассчитывать коэффициенты отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с одномерными волноводными фотонными кристаллами, содержащими диэлектрические и полупроводниковые слои.

Представлены результаты теоретического обоснования методов многопараметрового измерения полупроводниковых структур при их размещении

внутри нарушения периодичности одномерного волноводного фотонного кристалла и ее ориентации двумя способами относительно распространения электромагнитной волны.

Представлены полученные с использованием методов численного моделирования результаты теоретического обоснования возможности:

1. Одновременного определения параметров полупроводниковых структур в диапазоне удельных электропроводностей полупроводниковой подложки от $0.01 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ до $100 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, толщин эпитаксиального слоя от 10 мкм до 30 мкм и его электропроводностей от $1 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ до $800 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.
2. Одновременного определения параметров полупроводниковых структур в диапазоне толщин полупроводниковой подложки от 250 мкм до 1 мм, толщин эпитаксиального слоя от 5 мкм до 30 мкм и его электропроводностей от $1 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ до $800 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.
3. Измерения подвижности свободных носителей заряда в сильнолегированном эпитаксиальном слое с учетом отражения СВЧ-волны от переднего торца пластины при воздействии магнитного поля на полупроводниковую структуру, расположенную в центре поперечного сечения волновода в качестве дополнительного элемента фотонного кристалла.

При проведении компьютерного моделировании процедуры измерений поиск искомым значений проводился на основе решения обратной задачи методом наименьших квадратов с использованием спектров отражения и прохождения.

В третьем разделе приведены результаты экспериментальных исследований реализации предложенных методов. На основе решения обратных задач с использованием частотных зависимостей коэффициентов прохождения и отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с одномерными волноводными фотонными кристаллами были определены значения параметров эпитаксиальных полупроводниковых структур: толщины полупроводниковой подложки, толщины и удельной электропроводности сильнолегированного эпитаксиального полупроводникового слоя и подвижности свободных носителей заряда в нем, которые составляли $t_{\text{под}} = 480.3 \text{ мкм}$, $t_{\text{п}} = 13.14 \text{ мкм}$, $\sigma_{\text{п}} = 71.73 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ и $0.72 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

В ходе эксперимента была определена подвижность свободных носителей заряда в сильнолегированных эпитаксиальных слоях арсенид галлиевых структур.

Погрешность предложенного метода измерения подвижности свободных носителей заряда с учетом отражения СВЧ-волны от переднего торца пластины для слоев арсенида галлия толщиной $t_n = 2.17$ и 13.14 мкм, составила $\pm 5.0\%$ и $\pm 0.7\%$, соответственно, что значительно меньше погрешности определения подвижности свободных носителей заряда классическим методом СВЧ-магнитосопротивления, которая составила $\pm 22.7\%$ и $\pm 4.49\%$, соответственно.

В четвертом разделе представлены результаты исследования особенностей волноводно-диэлектрических резонансов, возникающих в результате частичного заполнения исследуемой металлодиэлектрической структурой поперечного сечения волновода по ширине и при размещении структуры перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода симметрично относительно его продольной оси. Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик структур, включающих металлические слои с толщинами от 0 до 80 нм, проводилось с использованием метода конечных элементов при помощи системы электродинамического моделирования и проектирования HFSS.

Теоретически обнаружен 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 $d(|D|^2)/dt$ частотных зависимостей коэффициента прохождения D электромагнитной волны к изменению толщины сверхтонкого 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.

Степень обоснованности научных положений, научная новизна и значимость полученных диссертантом результатов исследований не вызывают сомнений.

Среди наиболее значимых с научной точки зрения результатов, полученных автором, можно выделить следующие:

- 1 Снятие ограничения СВЧ-методов измерения параметров полупроводниковых структур, позволившее теоретически обосновать метод одновременного измерения трех параметров слоев в полупроводниковых n^+n -структурах и в структурах с полуизолирующей подложкой, выполняющих роль неоднородности в одномерном волноводном СВЧ фотонном кристалле, по частотным зависимостям коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения.
- 2 Теоретическое обоснование метода определения 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.
- 3 Теоретическое обоснование эффекта резонансного поглощения мощности электромагнитного излучения в слое металла толщиной менее 7.0 нм 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.
- 4 Теоретическое обоснование метода определения параметров нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку с применением явления возникновения волноводно-диэлектрического резонанса в случае частичного заполнения поперечного сечения волновода исследуемой структурой и в случае размещения исследуемой структуры в волноводе перпендикулярно широким и под углом к его узким стенкам

Следует отметить несомненную *практическую значимость* полученных в работе результатов.

Впервые реализован метод одновременного измерения толщины и удельной электропроводности слоев в полупроводниковых структурах с полуизолирующей подложкой и в n^+n -структурах, выполняющих роль неоднородности в волноводной фотонной структуре, по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения.

Реализован модифицированный метод СВЧ-магнитосопротивления для измерения подвижности свободных носителей заряда в сильнолегированном эпитаксиальном слое полупроводниковой структуры с учетом отражения СВЧ-волны от переднего торца пластины, при её размещении после фотонного кристалла в центре поперечного сечения прямоугольного волновода, с использованием спектров прохождения и отражения, измеренных при воздействии магнитного поля и в его отсутствии.

На основе схем, обеспечивающих возникновение волноводно-диэлектрического резонанса реализованы высокочувствительные методы измерения параметров нанометровых металлических слоев, нанесенных на керамическую подложку.

Защищаемые научные положения, научная новизна и значимость полученных результатов подтверждают обоснованность представления диссертации на стыке специальностей: радиофизика и твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Обоснованность и достоверность полученных диссертантом результатов, положений и сделанных им выводов обеспечивается качественным и количественным соответствием результатов теоретического анализа и компьютерного моделирования, с использованием численных методов, результатам, полученным экспериментально, строгостью используемых математических моделей, корректностью упрощающих допущений, сходимостью вычислительных процессов к искомым решениям, выполнимостью предельных переходов к известным решениям. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена применением современной измерительной аппаратуры, обработкой экспериментальных результатов с использованием стандартных методов.

Диссертация содержит хорошо оформленный иллюстративный материал.

По материалам диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России; 10 работ опубликованы в трудах Международных и Всероссийских конференций.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Работа не лишена отдельных недостатков:

1. Не обсуждены результаты расчета распределения электрического поля в волноводной фотонной структуре, используемой при многопараметровых измерениях.
2. Не обсуждены численные методы, использованные при решении обратной задачи. Не указано, в каком пакете прикладного программного обеспечения реализовано решение обратной задачи при нахождении значений параметров исследуемого образца по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с одномерным волноводным фотонным кристаллом с нарушением периодичности в виде исследуемых структур.
3. Не приведен диапазон подвижностей свободных носителей заряда и параметров полупроводниковых структур, в которых предлагается определять этот параметр предложенным модифицированным методом СВЧ-магнитосопротивления с учетом отражения СВЧ-волны от переднего торца пластины.

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера, поэтому не снижают ценности проведенных исследований.

Диссертация написана грамотным и профессиональным языком.

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 реализацией резонансных СВЧ-методов многопараметровых измерений электрофизических характеристик материалов и структур микро- и нанoeлектроники, основанных на применении СВЧ фотонных структур с нарушением периодичности, и схем, реализующих явление волноводно-диэлектрического резонанса.

Считаю, что диссертационная работа Е.В. Латышевой «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 нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникации
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
доктор технических наук, профессор

Коломейцев
Вячеслав Александрович

Подпись доктора технических наук, профессора Коломейцева Вячеслава Александровича

Заверяю:

Ученый секретарь

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.»
доктор технических наук, профессор

Бочкарев П. Ю.



Почтовый адрес:

410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Телефон: 8(8452) 99-88-18;

e-mail: rt.sstu@gmail.com