

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

Проведение теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку СВЧ-методов измерения параметров полупроводниковых и металлодиэлектрических структур является актуальной задачей радиофизики и твердотельной электроники. Среди методов контроля электрофизических параметров полупроводниковых и металлодиэлектрических структур, используемых при производстве устройств твердотельной СВЧ-электроники, важное место занимают СВЧ-методы, основанные на исследовании спектров отражения и прохождения электромагнитного излучения в линиях передачи, содержащих слоистые структуры. Для повышения чувствительности СВЧ-методов к изменению параметров анализируемых полупроводниковых и металлодиэлектрических структур используются электродинамические системы, характеризующиеся наличием высокоселективных резонансов. К таким системам можно отнести новый класс периодических структур – СВЧ фотонные кристаллы, характеризующиеся наличием в частотном диапазоне разрешенных и запрещенных зон. Наличие в спектре фотонного кристалла с нарушением периодичности резонансной особенности, называемой примесной модой колебаний, позволяет использовать высокую чувствительность примесной моды колебаний для разработки высокочувствительных методов определения параметров вышеуказанных полупроводниковых структур.

Кроме того, одиночные элементы, помещенные в волновод, позволяют получить волноводно-диэлектрический резонанс при возбуждении волн высших типов, и это также открывает возможность разрабатывать высокочувствительные методы определения параметров материалов и структур.

В связи с вышесказанным, **является актуальным** проведение автором диссертации теоретического и экспериментального обоснования резонансных СВЧ-методов, основанных на применении фотонных кристаллов с нарушением периодичности, и схем, реализующих явление волноводно-диэлектрического резонанса, для измерения ряда электрофизических характеристик слоистых полупроводниковых и металлдиэлектрических структур.

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, сформулированы цель диссертационного исследования и задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели, приведены основные положения, выносимые на защиту, описана структура и объем работы.

В **первом разделе** диссертации проведен критический анализ современного состояния методов исследований характеристик материалов и структур на сверхвысоких частотах. На основе результатов проведенного анализа сделан вывод об актуальности разработки новых резонансных СВЧ-методов для измерения основных параметров эпитаксиальных полупроводниковых структур и диэлектрических подложек с нанометровыми металлическими слоями, используемых при производстве устройств твердотельной СВЧ-электроники, микро- и наноэлектроники.

Во **втором разделе** представлена математическая модель, описывающая распространение электромагнитной волны СВЧ-диапазона в прямоугольном волноводе, содержащем одномерный СВЧ фотонный кристалл и исследуемую структуру, состоящую из подложки и легированного эпитаксиального слоя. Указанная модель позволяла рассчитывать коэффициенты отражения и прохождения электромагнитной волны. Приведено теоретическое обоснование возможности определения удельной электропроводности и толщины подложки и эпитаксиального слоя полупроводниковых структур в такой структуре с помощью метода наименьших квадратов по измеренным зависимостям коэффициентов отражения и прохождения. Показана возможность определения удельной электропроводности и толщины подложки и легированного эпитаксиального слоя

как методом перебора искомых параметров, так и путем решения обратной задачи методом наименьших квадратов.

Особое внимание было также уделено разработке метода измерения подвижности свободных носителей заряда в сильнолегированном эпитаксиальном слое. В результате был предложен модифицированный метод на основе СВЧ-магнитосопротивления, отличающийся учетом отражений от переднего торца пластины и размерного резонанса на длине эпитаксиальной структуры.

К замечаниям по первой главе можно отнести следующее:

1. В качестве диэлектрических слоев при создании фотонного кристалла в волноводе используются поликор и фторопласт. Диэлектрическая проницаемость поликора (9.6) допускает существование не только основной моды H_{10} , но и мод H_{20} и H_{30} . Этот факт в работе никак не комментируется и предполагается, что во всех слоях существует только основная мода.

2. Очевидно, что коэффициенты прохождения и отражения электромагнитной волны для фотонного кристалла с исследуемой структурой будут зависеть не только от проводимости и толщины подложки и легированного слоя, но и от их значений диэлектрической проницаемости. При этом в работе отмечено, что значения диэлектрической проницаемости слоя и подложки могут сильно различаться. Поскольку при описании математической модели диэлектрическая проницаемость вообще не упоминается, не совсем понятно, как автор сумел учесть этот факт.

3. В работе описана возможность одновременного определения значений толщины подложки и легированного слоя. Поскольку анализируются реально существующие полупроводниковые структуры, было бы проще, измерив общую толщину подложки и слоя избавиться от одного из искомых параметров, что существенно бы уменьшило время анализа и погрешность окончательных результатов.

Третий раздел посвящен реализации разработанного метода определения параметров полупроводниковых структур с использованием СВЧ фотонного кристалла с помощью метода наименьших квадратов по измеренным спектрам отражения и прохождения электромагнитной волны.

С использованием разработанного метода определены параметры реальной структуры арсенида галлия, состоящей из сильнолегированного эпитаксиального

слоя и полуизолирующей подложки. Исследовались различные конфигурации расположения исследуемого образца относительно слоев фотонного кристалла. Показано, что полученные значения толщины слоя и подложки, а также удельной электропроводимости слоя хорошо совпадают со значениями, полученными другими независимыми методами.

В этом же разделе описаны особенности эксперимента, позволившего реализовать вышеописанный модифицированный метод определения подвижности свободных носителей заряда путем использования СВЧ-магнитосопротивления. В результате были получены значения подвижности носителей заряда в сильнолегированных эпитаксиальных слоях для ряда конкретных образцов. Исследования показали, что учет отражения СВЧ-волны от переднего торца измеряемой структуры, позволил существенно уменьшить погрешность измерения подвижности свободных носителей заряда.

Замечание по третьему разделу состоит в следующем. Было проведено измерение подвижности носителей заряда в двух структурах классическим методом без учета отражения электромагнитной волны от переднего края исследуемой структуры, помещенной в волновод. Было отмечено, что погрешность определения при таком подходе лежит в пределах $\pm(4.5 - 23)\%$ и зависит от частоты волны и толщины эпитаксиального слоя. Показано, что предложенный модифицированный метод позволил существенно снизить погрешность, и поэтому было бы логично привести конкретное значение погрешности для этого случая. Однако конкретные значения погрешности для этого случая не приведены.

В четвертом разделе теоретически анализируются частотные зависимости коэффициента прохождения электромагнитного излучения в волноводе, содержащем диэлектрическую подложку с нанометровым металлическим слоем. Рассматривались две конфигурации частичного заполнения волновода исследуемой металлодиэлектрической структурой. В первом случае структура располагалась несимметрично относительно оси волновода и перпендикулярно широкой и узкой его стенкам, полностью заполняя волновод по высоте и частично по ширине. Во втором случае структура располагалась симметрично по отношению к оси волновода, перпендикулярно его широкой стенке и под углом к узкой.

Показано, что в обоих случаях возникают волноводно-диэлектрические резонансы с характерными минимумами на частотных зависимостях коэффициента прохождения. На этой основе был разработан метод определения толщины тонких металлических слоев на диэлектрических подложках, который был реализован и экспериментально подтвержден на конкретных структурах и также описан в этом разделе. Показано точное совпадение экспериментальной и теоретической зависимостей квадрата модуля коэффициента прохождения волны от толщины металлического слоя. Показано, что экспериментально достигнутая средняя чувствительность квадрата модуля коэффициента прохождения электромагнитной волны к изменению толщины сверхтонкого нанометрового металлического слоя в диапазоне от 0 до 13.0 нм составляет 1.14 дБ/нм.

К замечаниям по четвертому разделу можно отнести следующее.

1. В разделе проведен уникальный анализ сложных электродинамических структур, а относительно метода расчета не сказано ни слова. Указано лишь использование системы электродинамического моделирования и проектирования HFSS (High Frequency Structure Simulator).

2. Не совсем понятен вывод из рис.4.11 (диссертация) или рис.8 (автореферат) о том, что коэффициент прохождения увеличивается с ростом толщины металлического слоя. Казалось бы, что с ростом толщины слоя должен увеличиваться коэффициент отражения, а коэффициент прохождения должен уменьшаться.

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

Не вызывает сомнения **научная новизна, обоснованность и значимость** полученных диссертантом результатов. К числу значительных результатов, с научной точки зрения, можно отнести следующие результаты:

1. Теоретическое обоснование и экспериментальная реализация метода одновременного измерения трех основных физических параметров слоистых полупроводниковых структур, состоящих из эпитаксиального слоя и подложки с различными значениями проводимости и выполняющих роль неоднородности в одномерном волноводном СВЧ фотонном кристалле по частотным зависимостям коэффициентов отражения и прохождения

электромагнитного излучения. Очевидно, что разработанный метод может быть применен и для большего числа искомых параметров.

2. Теоретическое обоснование нового модифицированного метода СВЧ-магнитосопротивления, позволяющего провести измерения подвижности свободных носителей заряда в сильнолегированном эпитаксиальном слое полупроводниковой структуры в более строгой, чем в классическом методе СВЧ-магнитосопротивления, постановке задачи.
3. Теоретическое предсказание и экспериментальное подтверждение возникновения волноводно-диэлектрического резонанса при размещении диэлектрической подложки с нанометровым слоем металла в волноводе под углом к его узким стенкам, приводящего к резонансному поглощению мощности СВЧ-излучения.
4. Теоретическое обоснование сверхвысокой чувствительности частотных зависимостей коэффициента прохождения электромагнитной волны к изменению толщины сверхтонкого нанометрового металлического слоя в диапазоне от 0 до 1.0 нм, достигающей 36.8 дБ/нм, при возникновении в электродинамической системе волноводно-диэлектрического резонанса.

Защищаемые научные положения и полученные результаты позволяют сделать вывод об обоснованности представления диссертации на стыке специальностей: радиофизика и твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Результаты работы имеют также несомненную **ценность для практики**.

1. Впервые реализован метод одновременного измерения трех физических параметров полупроводниковых слоистых структур, содержащих подложку и легированный эпитаксиальный слой, выполняющих роль нарушения периодичности в одномерном волноводном фотонном кристалле, по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения.
2. Реализована технология измерения подвижности свободных носителей заряда в сильнолегированном эпитаксиальном слое полупроводниковой структуры с использованием модифицированного метода СВЧ-магнитосопротивления в более строгой, чем при классическом подходе, постановке задачи.

3. Предложены электродинамические системы, позволяющие реализовать высокочувствительные методы измерения толщины нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку, на основе волноводно-диэлектрического резонанса.

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 и корректностью упрощающих допущений. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена применением современной измерительной аппаратуры, обработкой экспериментальных результатов с использованием стандартных методов.

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.

Диссертация написана грамотным и профессиональным языком и иллюстративный материал ее хорошо оформлен.

Сделанные выше замечания по основным разделам никак не влияют на главные теоретические выводы диссертации и не меняют ее общей положительной оценки.

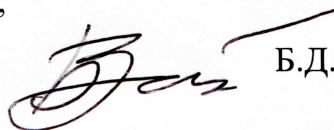
В целом, на основе анализа диссертации, автореферата и публикаций автора можно заключить, что работа Латышевой Е.В. является законченным научным исследованием, выполненном на высоком научно-техническом уровне. Совокупность научных результатов, изложенных в диссертации, можно квалифицировать как решение задачи, имеющей существенное значение для развития радиофизики и твердотельной электроники, связанной с реализацией резонансных СВЧ-методов для измерения ряда основных физических параметров различных полупроводниковых слоистых структур.

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 наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

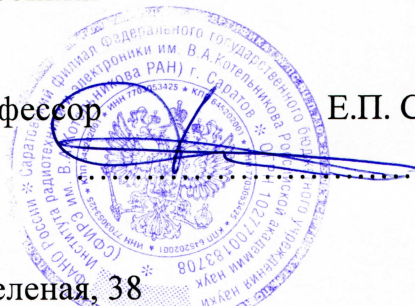
Официальный оппонент:

Заведующий лабораторией физической акустики
ФГБУН Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский филиал,
доктор физико-математических наук, профессор

 Б.Д. Зайцев

Подпись доктора физико-математических наук, профессора Б.Д. Зайцева
Заверяю:

Зам. директора по научной работе Саратовского филиала
ФГБУН «Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН»
доктор физико-математических наук, профессор

 Е.П. Селезнев

«28» октября 2016 г.

Почтовый адрес: 410019, г.Саратов, ул. Зеленая, 38
ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»,
Саратовский филиал

Телефон: 8-8452-277323; e-mail: zai-boris@yandex.ru