

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

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

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

аспиранта 4 курса ____ группы
направления 03.06.01 «Физика и астрономия»
факультета нано- и биомедицинских технологий

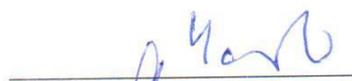
Латышева Екатерина Викторовна

Научные руководители:

Заслуженный деятель науки РФ,

профессор, д.ф.-м.н.

профессор, д.ф.-м.н.

 Д.А. Усанов
 А.В. Скрипаль

Саратов 2017

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Процессы, происходящие во многих выпускаемых промышленностью полупроводниковых приборах, в том числе активно используемых в современной твердотельной СВЧ-электронике, считаются известными и хорошо изученными. Однако, далеко не все экспериментальные данные, собранные в процессе исследования работы различных полупроводниковых структур, были получены на оборудовании, соответствующем современному уровню. Характеристики этих структур далеко не всегда исследовались с использованием появляющихся новых высокоточных методов измерений.

Наравне с экспериментальными совершенствуются и теоретические методы исследования, благодаря увеличению вычислительных мощностей современных ЭВМ, значительно уменьшился временной диапазон, затрачиваемый для решения электродинамических задач, необходимых для адекватного описания работы твердотельных приборов СВЧ. Современные ЭВМ позволяют решать системы нелинейных дифференциальных уравнений с использованием численных методов.

Применение слоистых структур на основе нанометровых полупроводниковых и металлодиэлектрических структур в микро-, акусто-, СВЧ- и оптоэлектронике часто определяется способностью отражать и поглощать электромагнитное излучение на различных частотах. Чувствительность изменения характеристик излучения к вариации параметров структур резко повышается, если частотные характеристики измерительных систем носят резонансный характер.

Одним из важнейших этапов в технологии производства современных устройств микро- и наноэлектроники является осуществление многопараметрового контроля электрофизических характеристик слоёв реальных нанометровых полупроводниковых и металлодиэлектрических структур.

Использование современных экспериментальных методов исследования и теоретическое описание без применения упрощающих предположений открывает возможность расширить функциональные возможности резонансных СВЧ-методов контроля параметров эпитаксиальных полупроводниковых металлодиэлектрических структур с нанометровыми слоями.

Среди методов, позволяющих контролировать электрофизические параметры структур, содержащих полупроводниковые и нанометровые металлические слои, важное место занимают СВЧ-методы, основанные на исследовании характеристик распространения электромагнитного излучения в волноведущих системах при введении в них металлических, диэлектрических и полупроводниковых элементов. Эти методы являются наиболее предпочтительными для определения параметров материалов и струк-

тур, 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.

С целью повышения чувствительности СВЧ-методов используются электродинамические системы, в которых частотная зависимость коэффициентов отражения и прохождения для измеряемых слоистых структур резко изменяется при вариации параметров входящих в их состав металлических и полупроводниковых слоев.

К такого рода системам относятся одномерные волноводные СВЧ фотонные кристаллы. При наличии дефекта в такой структуре, нарушающего периодичность, в фотонной запрещенной зоне может проявляться резонансная особенность [1], называемая примесной модой колебаний [2] и обладающая высокой чувствительностью к параметрам дефекта.

К настоящему времени разработан ряд методов определения параметров металлодиэлектрических и полупроводниковых структур, основанных на использовании СВЧ фотонных кристаллов с нарушением периодичности. Данные методы позволяют определять комплексную диэлектрическую проницаемость твердых и жидких диэлектриков, толщину или удельную электропроводность нанометровых металлических пленок.

Известно, что одномерные волноводные СВЧ фотонные кристаллы используются для реализации методов одновременного определения одного или двух параметров полупроводниковых структур, например, толщины и удельной электропроводности высоколегированного полупроводникового слоя, нанесенного на полуизолирующую подложку [3], или толщины металлического слоя, нанесенного на полупроводниковую подложку, и удельной электропроводности подложки.

В то же время эти методы предполагают использование независимых способов для определения остальных параметров полупроводниковой структуры кроме измеряемых.

В связи с этим является актуальной разработка и реализация методов многопараметровых измерений электрофизических характеристик эпитаксиальных полупроводниковых структур с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов, в частности, одновременное измерение трех и более параметров полупроводниковых слоистых структур, включая параметры полупроводниковой подложки. В том числе для разработки полупроводниковых приборов несомненный интерес представляет усовершенствование методов определения подвижности свободных носителей заряда в тонких слоях полупроводниковых эпитаксиальных структур.

При реализации методов измерения, в основе которых лежит взаимодействие электромагнитного излучения с фотонными кристаллами, необходимо соблюдение постоянства электрофизических и геометрических параметров элементов периодической структуры. Достижение доста-

точно больших продольных размеров одномерного фотонного кристалла в СВЧ-диапазоне при увеличении числа периодически повторяющихся элементов может приводить к ограничению добротности примесной моды колебаний и, следовательно, чувствительности спектров электромагнитного излучения к вариации параметров металлодиэлектрических или полупроводниковых структур, выполняющих роль нарушений периодичности.

Поэтому представляет значительный научный и практический интерес поиск новых решений, позволяющих реализовать методики измерений параметров металлодиэлектрических структур с использованием СВЧ-схем, содержащих минимальное число элементов и обеспечивающих реализацию резонансных особенностей амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), обладающих высокой чувствительностью к вариации параметров сверхтонких проводящих пленок с толщинами, составляющими единицы нанометров.

Одним из таких решений может быть реализация волноводно-диэлектрического резонанса с использованием одиночных элементов, позволяющего реализовать методы определения параметров материалов и структур при возбуждении в электродинамической системе волн высших типов, которые обеспечивают возникновение высокодобротных резонансных особенностей [4].

Цель научной квалификационной работы:

Теоретическое и экспериментальное обоснование резонансных СВЧ-методов, основанных на применении фотонных кристаллов с нарушением периодичности, и схем, реализующих явление волноводно-диэлектрического резонанса, для многопараметровых измерений электрофизических характеристик полупроводниковых и металлодиэлектрических структур с нанометровыми слоями.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

Разработка методов многопараметрового определения характеристик полупроводниковых слоистых структур на основе решения обратных задач по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с одномерным волноводным фотонным кристаллом с нарушением периодичности в виде исследуемых структур.

Экспериментальная реализация методов одновременного измерения толщины и удельной электропроводности слоев в полупроводниковых структурах с полуизолирующей подложкой, выполняющих роль нарушения периодичности в одномерном волноводном СВЧ фотонном кристалле, по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения.

Разработка и экспериментальная реализация модифицированного метода СВЧ-магнитосопротивления для измерения подвижности свободных носителей заряда в сильнолегированном эпитаксиальном слое,

основанного на решении обратной задачи с использованием частотных зависимостей коэффициентов прохождения и отражения, измеренных при воздействии магнитного поля и в его отсутствии.

Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик и разработка высокочувствительного метода измерения параметров нанометрового металлического слоя, нанесенного на диэлектрическую подложку, при возникновении в электродинамической системе волноводно-диэлектрического резонанса.

Экспериментальная реализация метода измерения параметров нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку, с использованием волноводно-диэлектрического резонанса.

Новизна исследований, проведенных в ходе научной квалификационной работы, состоит в следующем:

Разработано теоретическое обоснование метода одновременного измерения удельной электропроводности подложки полупроводниковой структуры, толщины и удельной электропроводности сильнолегированного эпитаксиального слоя в полупроводниковых $n^+ - n$ -структурах, выполняющих роль нарушения периодичности в одномерном волноводном СВЧ фотонном кристалле, по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения.

Разработано теоретическое обоснование метода одновременного измерения толщины подложки полупроводниковой структуры, толщины и удельной электропроводности сильнолегированного эпитаксиального слоя в полупроводниковых $n^+ - n$ -структурах и в структурах с полуизолирующей подложкой, выполняющих роль нарушения периодичности в одномерном волноводном СВЧ фотонном кристалле, по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения.

Разработан модифицированный метод 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.

Теоретически обоснован 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.

Обосновано применение явления возникновения волноводно-диэлектрического резонанса для измерения параметров нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку, при

размещении металлодиэлектрической структуры в волноводе асимметрично относительно его середины, полностью заполняющей его по высоте и частично по ширине.

Обосновано применение явления возникновения волноводно-диэлектрического резонанса для измерения параметров нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку, при размещении металлодиэлектрической структуры в волноводе перпендикулярно широким и под углом к его узким стенкам симметрично относительно продольной оси волновода.

Достоверность результатов научной квалификационной работы обеспечивается качественным и количественным соответствием выводов теории основным 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 стандартной измерительной аппаратуры, обработкой экспериментальных данных с использованием стандартных методов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

Реализованы методы 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.

Реализован модифицированный метод 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.

Реализован метод измерения параметров нанометровых металлических слоев, нанесенных на керамическую подложку, с использованием волноводно-диэлектрического резонанса.

Основные положения, выносимые на защиту:

По измеренным частотным зависимостям коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с одномерным волноводным фотонным кристаллом, при наличии в нём нарушения периодичности в виде измененной длины центрального слоя и введенной в нарушенный слой полупроводниковой структуры, в результате решения обратной задачи при известных

параметрах периодически чередующихся слоев возможно определение трех параметров полупроводниковой структуры одновременно: удельной электропроводности полупроводниковой подложки, толщины эпитаксиального слоя и его удельной электропроводности или толщины полупроводниковой подложки, толщины эпитаксиального слоя и его удельной электропроводности.

С использованием модифицированного метода СВЧ-магнитосопротивления в результате решения обратной задачи возможно измерение 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.

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

По измеренным частотным зависимостям коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона в условиях возникновения волноводно-диэлектрического резонанса при размещении металлодиэлектрической структуры в волноводе асимметрично относительно его середины, полностью заполняющей его по высоте и частично по ширине, или при размещении металлодиэлектрической структуры в волноводе перпендикулярно широким и под углом к его узким стенкам симметрично относительно продольной оси волновода, возможно определение параметров нанометрового металлического слоя, нанесенного на диэлектрическую подложку.

Апробация работы:

Основные результаты научной квалификационной работы доложены на:

- Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами», г. Саратов, 14–15 мая 2014 г.;
- 44th European Microwave Conference. Rome, Italy, 6-9 October 2014;
- 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications “MIKON–2014”. Gdansk, Poland, June 16–18 2014;
- 24-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014). Севастополь, 7–13 сентября 2014 г.;
- Microwave Symposium (IMS), Phoenix, AZ, USA, 17–22 May 2015;
- Международной научно-технической конференции «Электроника 2015». Зеленоград, 19–20 ноября 2015 г.;

- Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами», г. Саратов, 14–15 мая 2015 г.;
- V Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» Санкт-Петербург, 30 мая–2 июня 2016 г.;
- Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами», г. Саратов, 19–20 мая 2016 г.;
- 21th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications MIKON-2016, Krakow, Poland, May 9–11, 2016;
- 26-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016). Севастополь, 4–10 сентября 2016 г.

Исследования выполнялись в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации по теме «Исследование эффектов резонансного взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного и терагерцового диапазонов с неоднородными микро- и наноструктурами и композитами» №16.1575.2014/К, шифр: «Наноскоп-2»; государственного задания Министерства образования и науки РФ НИР «Разработка на основе фотонных кристаллов СВЧ-методов контроля высокого разрешения параметров наноструктур и нанокompозитов» на 2012–2014 годы, шифр «Нанокomплекc»; НИР «Разработка многопараметрового метода контроля эпитаксиальных полупроводниковых структур с использованием одномерных сверхвысокочастотных фотонных кристаллов» по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») 2015 Договор № 9011ГУ/2015 (код 0018459).

Публикации. По материалам научной квалификационной работы опубликовано 15 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК; 11 работ опубликованы в сборниках конференций.

Личный вклад автора выразился в проведении всего объема экспериментальных работ, в создании теоретических моделей, описывающих результаты экспериментов, проведении компьютерного моделирования и анализе полученных результатов.

Структура и объем научной квалификационной работы. Научная квалификационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 122 страницах, содержит 38 рисунков и список литературы из 185 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе проведен критический анализ современного состояния СВЧ-методов исследований характеристик материалов и структур, используемых в СВЧ-электронике.

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

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 γ_j и γ_{j+1} :

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

где N – число слоёв.

Коэффициенты отражения и прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с многослойной структурой, выражаются через элементы матрицы передачи \mathbf{T}_N :

$$R = -\frac{\mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}, \quad D = \frac{\mathbf{T}_N[1,1] \cdot \mathbf{T}_N[2,2] - \mathbf{T}_N[1,2] \cdot \mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]} \quad (2)$$

Постоянные распространения электромагнитной волны $\gamma_0, \gamma_d, \gamma_{п,под}$ соответственно в пустом волноводе, в диэлектрических и полупроводниковых слоях, полностью заполняющих волновод по поперечному сечению, рассчитываются с использованием выражений:

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0}, \quad \gamma_d = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_d \varepsilon_0 \mu_0}, \quad \gamma_{п,под} = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_{п,под}^* \varepsilon_0 \mu_0}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{п,под}^* = \varepsilon'_{п,под} - j\varepsilon''_{п,под}$ – комплексные диэлектрические проницаемости сильнолегированного полупроводникового n^+ -слоя и полупроводниковой подложки; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота электромагнитной волны; ε_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума; ε_d – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического слоя.

При компьютерном моделировании процедуры измерения параметров полупроводниковых слоистых структур на СВЧ рассматривался одномерный волноводный фотонный кристалл, составленный из одиннадцати слоев, которые образуют структуру из периодически повторяющихся элементов, каждый из которых включает в себя два слоя. Нечетные слои были выполнены из поликора (Al_2O_3 , $\varepsilon = 9.6$), четные выполнены из фторопласта ($\varepsilon = 2.0$). Длина нечетных отрезков – 1.0 мм, четных – 9.0 мм. Нарушение периодичности создавалось посредством изменения длины центрального слоя. Длина центрального нарушенного (фторопласт) слоя выбиралась равной 4.0 мм. Измеряемая структура, помещаемая на границе нарушенного центрального слоя фторопласта и следующего за ним слоя поликора, ориентировалась двумя способами относительно направления распространения электромагнитной волны. Расположение образца внутри нарушенного слоя и его ориентация относительно этого слоя (конфигурация 1 и 2) в фотонном кристалле представлены на рис. 1.

Исследуемые образцы представляли собой эпитаксиальные арсенид-галлиевые структуры толщиной $t_s = t_n + t_{\text{под}}$, состоящие из сильнолегированного эпитаксиального n^+ -слоя толщиной t_n с электропроводностью σ_n и полупроводниковой подложки толщиной $t_{\text{под}}$ с электропроводностью $\sigma_{\text{под}}$.

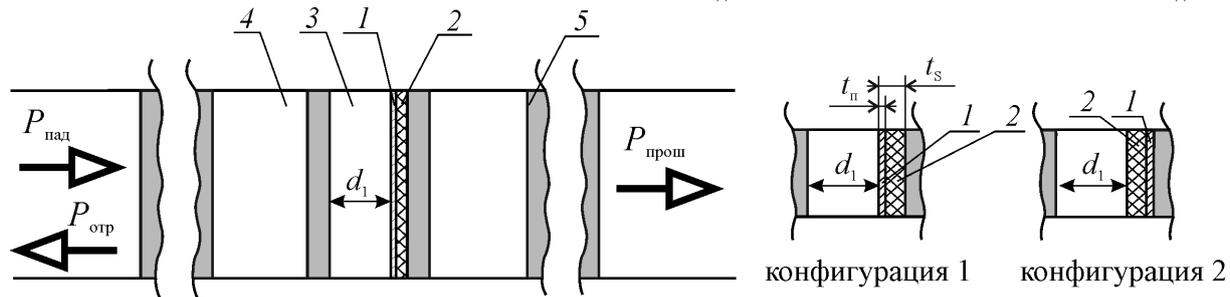


Рис. 1 Расположение полупроводниковой структуры относительно нарушенного слоя в волноводном СВЧ фотонном кристалле: 1 — сильнолегированный полупроводниковый слой, 2 — полупроводниковая подложка, 3 — нарушенный центральный слой, 4 и 5 — периодически чередующиеся слои с различными значениями диэлектрической проницаемости

Проведено теоретическое обоснование метода одновременного измерения удельной электропроводности подложки полупроводниковой структуры, толщины и удельной электропроводности сильнолегированного эпитаксиального слоя в полупроводниковых $n^+ - n$ -структурах, выполняющих роль нарушения периодичности в одномерном волноводном СВЧ фотонном кристалле, по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения.

Для одновременного нахождения электропроводности $\sigma_{\text{под}}$ полупроводниковой подложки, толщины t_n и электропроводности σ_n сильнолегированного полупроводникового n^+ -слоя по частотным зависимостям $D(\omega)$ и $R(\omega)$ был использован метод наименьших квадратов, при реализации кото-

рого находится такое значение параметров $\sigma_{\text{под}}$, $t_{\text{п}}$ и $\sigma_{\text{п}}$, при котором сумма $S(\sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})$ квадратов разностей расчетных $|D(\omega, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2$ и $|R(\omega, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2$ и экспериментальных (исходных) $|D_{\text{эксп}}|^2$ и $|R_{\text{эксп}}|^2$ значений квадратов модулей коэффициентов прохождения и отражения, измеренных при двух различных конфигурациях (рис. 1) нарушенного фотонного кристалла

$$S(\sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}}) = \sum_{i=1}^K \left(\left(|D_1(\omega_i, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2 - |D_{i1\text{эксп}}|^2 \right)^2 + \left(|R_1(\omega_i, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2 - |R_{i1\text{эксп}}|^2 \right)^2 + \left(|D_2(\omega_i, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2 - |D_{i2\text{эксп}}|^2 \right)^2 + \left(|R_2(\omega_i, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2 - |R_{i2\text{эксп}}|^2 \right)^2 \right), \quad (4)$$

становится минимальной. Здесь K – число измеренных значений коэффициентов прохождения и отражения.

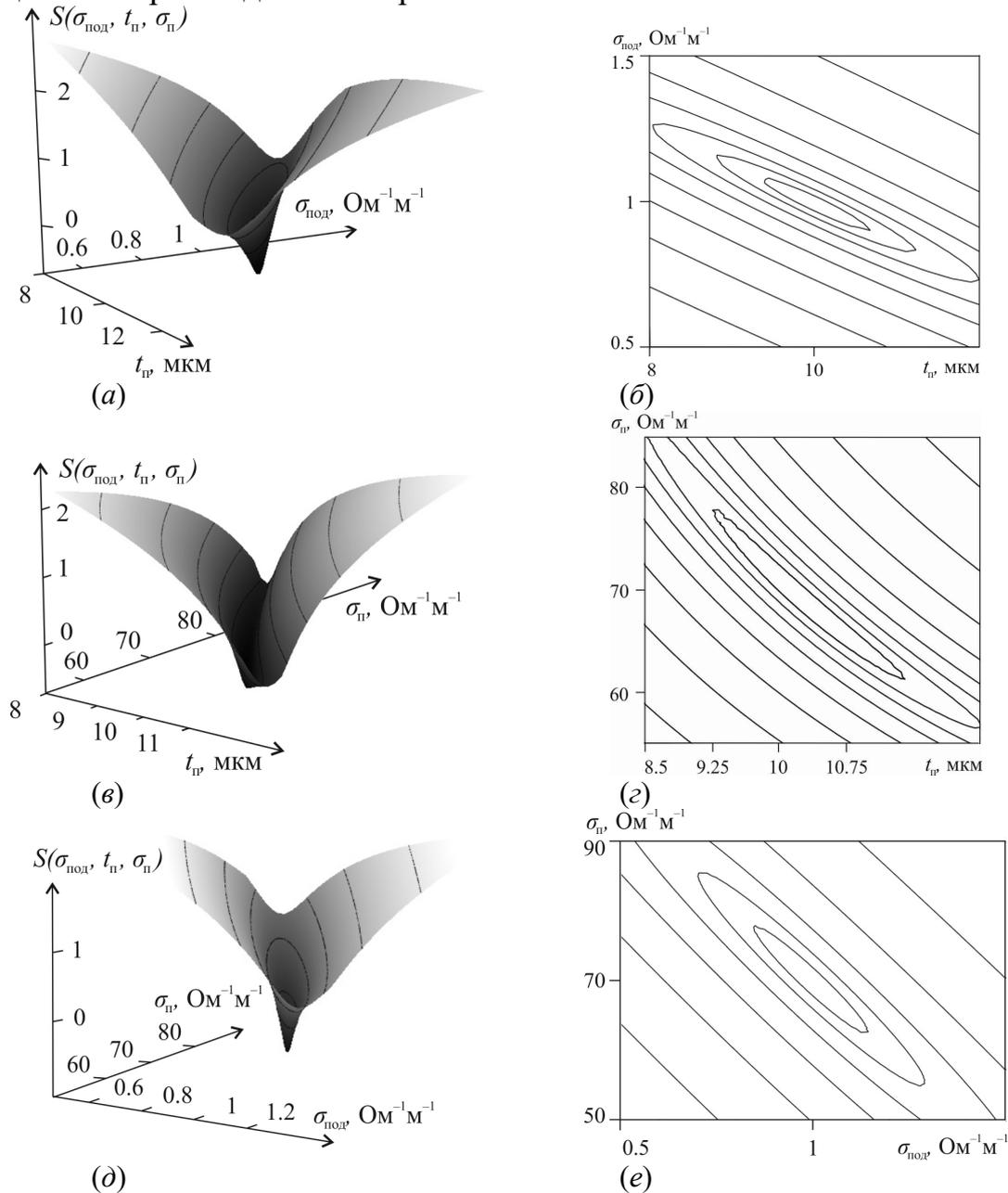


Рис. 2 Вид функции невязок в пространстве и контурные карты в плоскостях искомых параметров а), б) – $(\sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}})$; в), з) – $(\sigma_{\text{п}}, t_{\text{п}})$; д), е) – $(\sigma_{\text{под}}, \sigma_{\text{п}})$ для образца

арсенид галлиевой структуры с эпитаксиальным слоем толщиной $t_n = 10.0 \text{ мкм}$ и электропроводностью $\sigma_n = 70.0 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, выращенным на полупроводниковой подложке с электропроводностью $\sigma_{\text{под}} = 1.0 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ и толщиной $t_{\text{под}} = 480 \text{ мкм}$

Искомые значения параметров исследуемого образца определяются численным методом в результате решения системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S(\sigma_{\text{под}}, t_n, \sigma_n)}{\partial \sigma_{\text{под}}} = 0, \\ \frac{\partial S(\sigma_{\text{под}}, t_n, \sigma_n)}{\partial t_n} = 0, \\ \frac{\partial S(\sigma_{\text{под}}, t_n, \sigma_n)}{\partial \sigma_n} = 0. \end{array} \right. \quad (5)$$

Функция невязок $S(\sigma_{\text{под}}, t_n, \sigma_n)$, определяемая выражением (4) и представленная на рис. 2, а, 2, в, 2, д, для случая, когда электропроводность $\sigma_{\text{под}}$ полупроводниковой подложки составляла $1.0 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, а толщина и электропроводность сильнолегированного полупроводникового n^+ -слоя GaAs $t_n = 10.0 \text{ мкм}$ и $\sigma_n = 70.0 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, как следует из результатов расчета, обладает глобальным минимумом в пространстве координат $(\sigma_{\text{под}}, t_n, \sigma_n, S(\sigma_{\text{под}}, t_n, \sigma_n))$, а контурные карты (рис. 2, б, 2, г, 2, е) характеризуются наличием замкнутых траекторий вблизи минимума, что подтверждает возможность однозначно определять электропроводность полупроводниковой подложки, толщину и электропроводность полупроводникового слоя из решения системы уравнений (5).

Значения удельной электропроводности полупроводниковой подложки, сильнолегированного эпитаксиального слоя и его толщины, определенные из решения обратной задачи с использованием системы уравнений (5), составили $\sigma_{\text{под}} = 0.95 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, $t_n = 10.32 \text{ мкм}$ и $\sigma_n = 70.1 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, соответственно.

Разработано теоретическое обоснование метода одновременного измерения толщины подложки полупроводниковой структуры, толщины и удельной электропроводности сильнолегированного эпитаксиального слоя в полупроводниковых $n^+ - n$ -структурах и в структурах с полуизолирующей подложкой, выполняющих роль нарушения периодичности в одномерном волноводном СВЧ фотонном кристалле, по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения.

Для одновременного нахождения толщины полупроводниковой подложки $t_{\text{под}}$, толщины t_n и электропроводности σ_n сильнолегированного слоя по частотным зависимостям $D(\omega)$ и $R(\omega)$ был использован метод наименьших квадратов. В этом случае вид функции невязок $S(t_{\text{под}}, t_n, \sigma_n)$, используемой при решении обратной задачи имеет вид:

$$S(t_{\text{под}}, t_n, \sigma_n) = \sum_{i=1}^K \left(\left(D_1(\omega_i, t_{\text{под}}, t_n, \sigma_n) \right)^2 - |D_{i1\text{эксп}}|^2 \right)^2 + \left(R_1(\omega_i, t_{\text{под}}, t_n, \sigma_n) \right)^2 - |R_{i1\text{эксп}}|^2 \right)^2 + \left(\left(D_2(\omega_i, t_{\text{под}}, t_n, \sigma_n) \right)^2 - |D_{i2\text{эксп}}|^2 \right)^2 + \left(R_2(\omega_i, t_{\text{под}}, t_n, \sigma_n) \right)^2 - |R_{i2\text{эксп}}|^2 \right)^2 \right). \quad (6)$$

Искомые значения параметров исследуемого образца определяются численным методом в результате решения системы уравнений:

$$\left\{ \frac{\partial S(t_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})}{\partial t_{\text{п}}} = 0, \frac{\partial S(t_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})}{\partial t_{\text{под}}} = 0, \frac{\partial S(t_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})}{\partial \sigma_{\text{п}}} = 0 \right. \quad (7)$$

Решена задача измерения подвижности свободных носителей заряда с использованием разработанного модифицированного метода СВЧ-магнитосопротивления с учетом отражения СВЧ-волны от переднего торца пластины.

Исследуемая эпитаксиальная полупроводниковая структура помещается в E -плоскости в центре поперечного сечения прямоугольного волновода после волноводного фотонного кристалла, вектор магнитной индукции \vec{B} магнитного поля направлен перпендикулярно узким стенкам волновода (рис. 3).

Такая конфигурация обеспечивает возникновение ярко выраженной резонансной особенности на АЧХ, что увеличивает проявление эффекта СВЧ-магнитосопротивления.

Для описания взаимодействия электромагнитной волны со структурой, представленной на рис. 3, использовалась матрица передачи, элементы которой определяются через постоянные распространения электромагнитной волны на каждом из участков волноводной структуры.

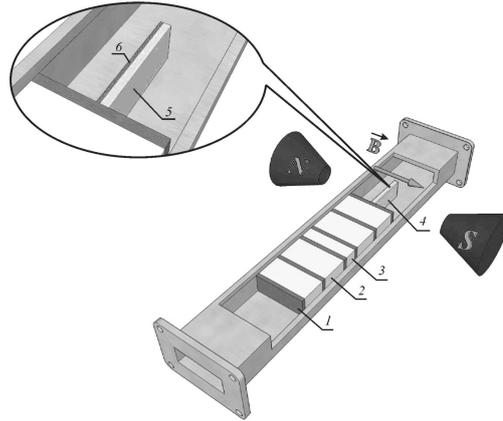


Рис. 3 Расположение фотонного кристалла и эпитаксиальной полупроводниковой структуры в волноводе. 1–слой поликора, 2–слой фторопласта, 3–нарушенный слой фторопласта, 4–измеряемая структура арсенида галлия, в состав которой входят: 5–высокоомная подложка, 6–сильнолегированный полупроводниковый слой. N и S – полюса электромагнита

Постоянная распространения волны на участке с полупроводниковой структурой, в случае, если её параметры удовлетворяют соотношениям $t_{\text{п}} \ll t_S$, $\sigma_{\text{п}} \gg \sigma_{\text{под}}$, $\sigma_{\text{под}} t_S \ll \sigma_{\text{п}} t_{\text{п}}$, $t_S \ll a$, имеет вид:

$$\gamma = i\beta_0 + \frac{k_0^2 \sigma_{\text{п}} t_{\text{п}}}{\beta_0 \omega \varepsilon_0 a} \cdot \frac{1}{1 + \mu^2 B^2} + i \left(\beta_0 - \frac{k_0^2 \sigma_{\text{п}} t_{\text{п}}}{\beta_0 \varepsilon_0 a} \cdot \frac{\tau(1 - \mu^2 B^2)}{(1 + \mu^2 B^2)^2} + \frac{k_0^2 (\varepsilon_S - 1) t_S}{\beta_0 a} \right), \quad (8)$$

где k_0 – фазовая постоянная распространения электромагнитной волны H_{10} в свободном пространстве, ε_S – относительная диэлектрическая проницае-

мость решетки полупроводникового слоя, τ – время релаксации импульса свободных носителей заряда.

Для нахождения подвижности свободных носителей заряда по частотным зависимостям $D(\omega)$ и $R(\omega)$ был использован метод наименьших квадратов, при реализации которого находится такое значение подвижности μ при котором сумма $S(\mu)$ квадратов разностей расчетных $|D(\omega, \mu)|^2$ и $|R(\omega, \mu)|^2$ и экспериментальных $|D_{\text{эксп}}|^2$ и $|R_{\text{эксп}}|^2$ значений квадратов модулей коэффициентов прохождения и отражения, измеренных при воздействии магнитного поля и без него

$$S(\mu) = \sum_{i=1}^K \left(\left(|D(\omega_i, \mu)|^2 - |D_{\text{эксп}}|^2 \right)^2 + \left(|D_B(\omega_i, \mu)|^2 - |D_{iB\text{эксп}}|^2 \right)^2 + \left(|R(\omega_i, \mu)|^2 - |R_{\text{эксп}}|^2 \right)^2 + \left(|R_B(\omega_i, \mu)|^2 - |R_{iB\text{эксп}}|^2 \right)^2 \right), \quad (9)$$

становится минимальной. Здесь $|D_{\text{эксп}}|^2$, $|D_{B\text{эксп}}|^2$, $|R_{\text{эксп}}|^2$ и $|R_{B\text{эксп}}|^2$ – измеренные величины квадратов модулей коэффициентов прохождения и отражения электромагнитной волны в отсутствие внешнего магнитного поля и при воздействии магнитного поля с индукцией B , соответственно.

Погрешность метода измерения подвижности свободных носителей оценивалась с использованием численного эксперимента, величина которой для структур с толщиной эпитаксиального слоя $t_{\text{п}} = 2.17 \text{ мкм}$ составила $\pm 5.0\%$, с толщиной $t_{\text{п}} = 13.14 \text{ мкм}$ составила $\pm 0.7\%$.

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 $t_{\text{под}} = 480.3 \text{ мкм}$ и сильнолегированного эпитаксиального слоя, толщина $t_{\text{п}}$ которого составляла 13.14 мкм , электропроводность $\sigma_{\text{п}} = 71.73 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$.

Функция невязок $S(t_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})$, построенная с использованием результатов экспериментальных измерений согласно выражению (6), обладает глобальным минимумом в пространстве координат $(t_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}}, S(t_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}}))$, а контурные карты (рис. 4) характеризуются наличием замкнутых траекторий вблизи минимума, что подтверждает возможность однозначно опреде-

лять толщину полупроводниковой подложки, толщину и электропроводность полупроводникового слоя.

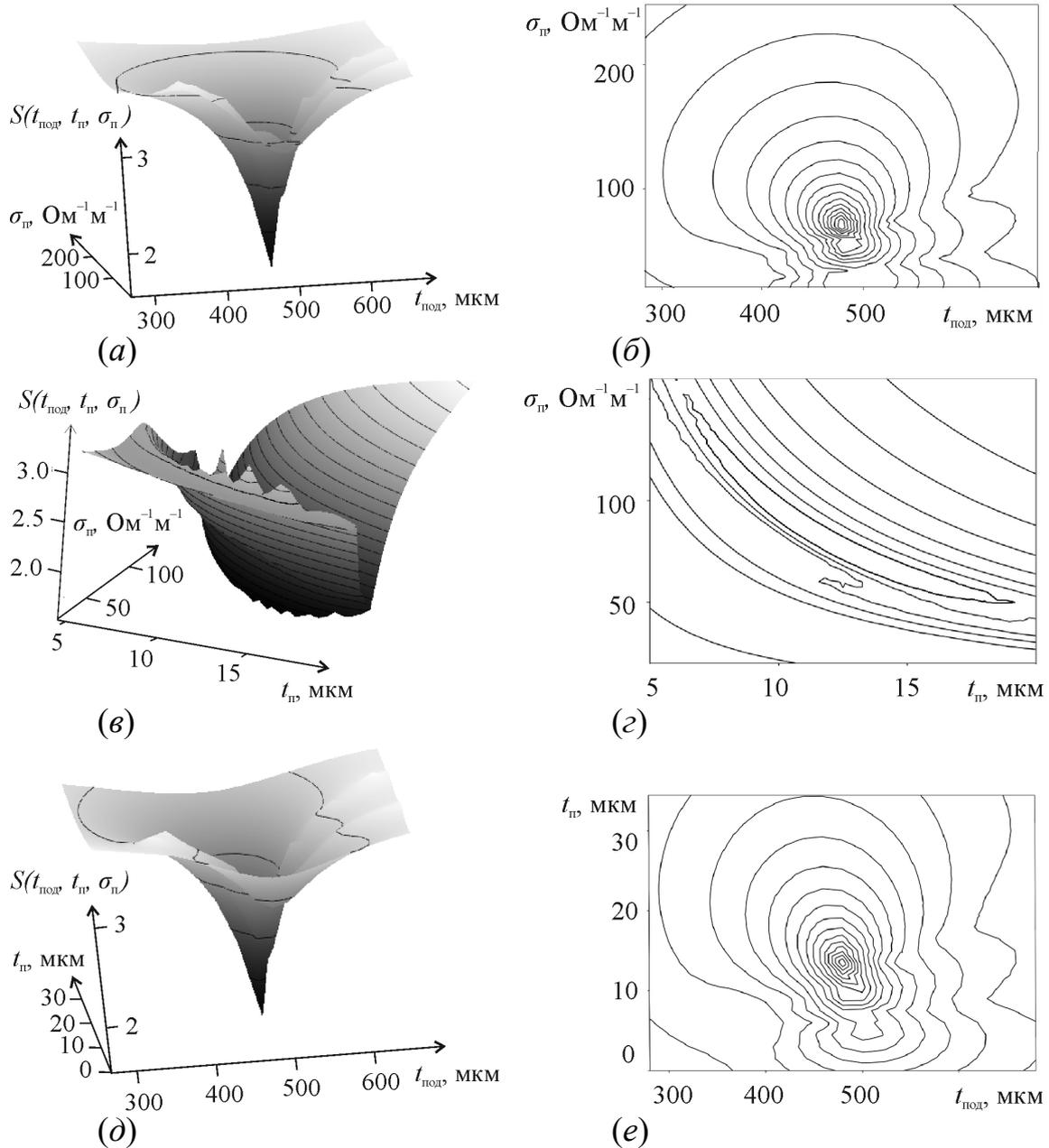


Рис. 4 Вид функции невязок в пространстве и контурные карты в плоскостях искоемых параметров а), б) – $(t_{\text{под}}, \sigma_{\text{п}})$; в), з) – $(t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})$; д), е) – $(t_{\text{под}}, t_{\text{п}})$ для образца арсенид галлиевой структуры с эпитаксиальным слоем толщиной $t_{\text{п}} = 13.14 \text{ мкм}$ и электропроводностью $\sigma_{\text{п}} = 71.73 \text{ Ом}^{-1}\text{М}^{-1}$, выращенным на высокоомной подложке толщиной $t_{\text{под}} = 480.3 \text{ мкм}$

На рис. 5 представлены экспериментальные и рассчитанные частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения и прохождения для двух конфигураций фотонной структуры (см. вставку к рис. 1) при значениях толщины высокоомной подложки $t_{\text{под}} = 480.3 \text{ мкм}$, толщины

полупроводникового слоя $t_n = 13.14 \mu\text{мкм}$ и его электропроводности $\sigma_n = 71.73 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, определённых из решения обратной задачи.

Полученные значения толщин подложки и эпитаксиального слоя арсенида галлия хорошо соотносятся со значениями, измеренными независимыми методами.

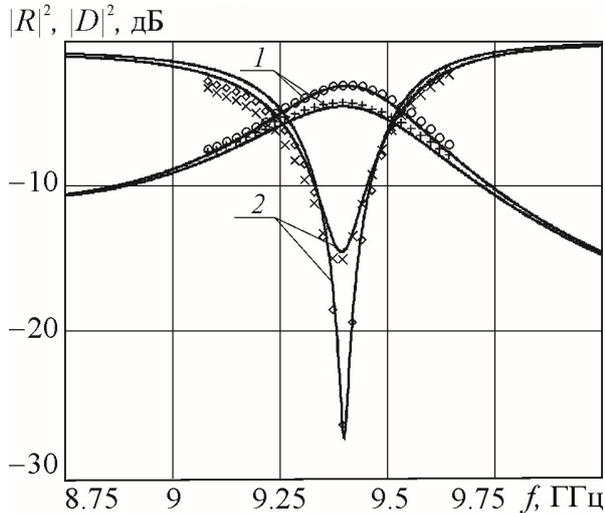


Рис. 5 Экспериментальные ($\diamond\diamond\diamond$, $\circ\circ\circ$, $\times\times\times$, $++++$) и рассчитанные (линии) частотные зависимости $|D|^2$ (кривые 1) и $|R|^2$ (кривые 2) для двух конфигураций фотонной структуры (см. вставку к рис. 1: конфигурация 1 – $\diamond\diamond\diamond$ и $\circ\circ\circ$; конфигурация 2 – $\times\times\times$ и $++++$), содержащей образец арсенид галлиевой структуры с эпитаксиальным слоем толщиной $t_n = 13.14 \mu\text{мкм}$ и электропроводностью $\sigma_n = 71.73 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, выращенным на высокоомной подложке толщиной $t_{\text{под}} = 480.3 \mu\text{мкм}$

Для определения подвижности свободных носителей заряда μ 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 (рис. 3).

Искомые значения подвижности для структур с толщинами сильнолегированных полупроводниковых слоев $t_n = 2.17 \mu\text{мкм}$ и $t_n = 13.14 \mu\text{мкм}$ определялись численным методом в результате решения обратной задачи с использованием функции невязки (9) и составили $0.591 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и $0.72 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, соответственно.

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 широкому и под углом к узким стенкам волновода симметрично относительно его продольной оси.

Исследовалось взаимодействие электромагнитного излучения трехсантиметрового диапазона длин волн с двухслойной структурой, состоящей из пластины поликора с нанесенным нанометровым металлическим слоем (толщиной t и электропроводностью σ), при ее размещении в волноводе сечением $23 \times 10 \text{ мм}$ двумя способами: асимметрично относительно середины волновода, полностью заполняя его по высоте и частично по ши-

рине (см. рис.6 а); перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода симметрично относительно его продольной оси (см. рис.6 б).

Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик в системе с нанометровым металлическим слоем на диэлектрической подложке при возникновении волноводно-диэлектрического резонанса было выполнено при помощи системы электродинамического моделирования и проектирования HFSS (High Frequency Structure Simulator).

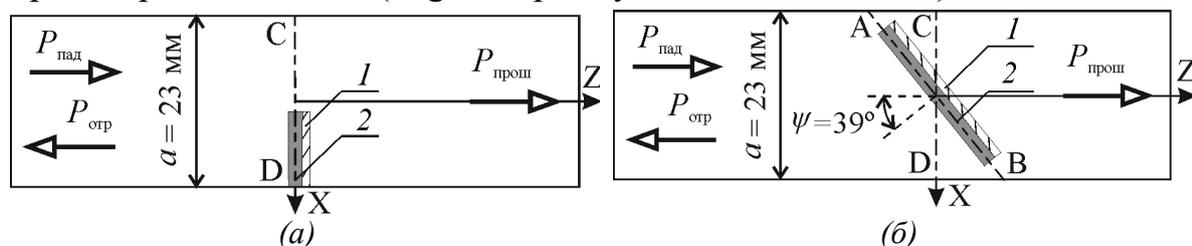


Рис. 6 Расположение исследуемой структуры в волноводе: 1 — TaAlN, 2 — Al₂O₃. $P_{пад}$ —падающая мощность, $P_{прош}$ —прошедшая мощность, $P_{отр}$ —отраженная мощность

Результаты расчета частотных зависимостей квадратов модулей коэффициентов прохождения электромагнитного излучения $|D|^2$ в случае частичного заполнения волновода металлодиэлектрической структурой (см. рис.6 а) и при размещении под углом к узким стенкам волновода (см. рис.6 б) при различных значениях толщины t нанометровой металлической пленки представлены на рис. 7 а и рис. 7 б, соответственно.

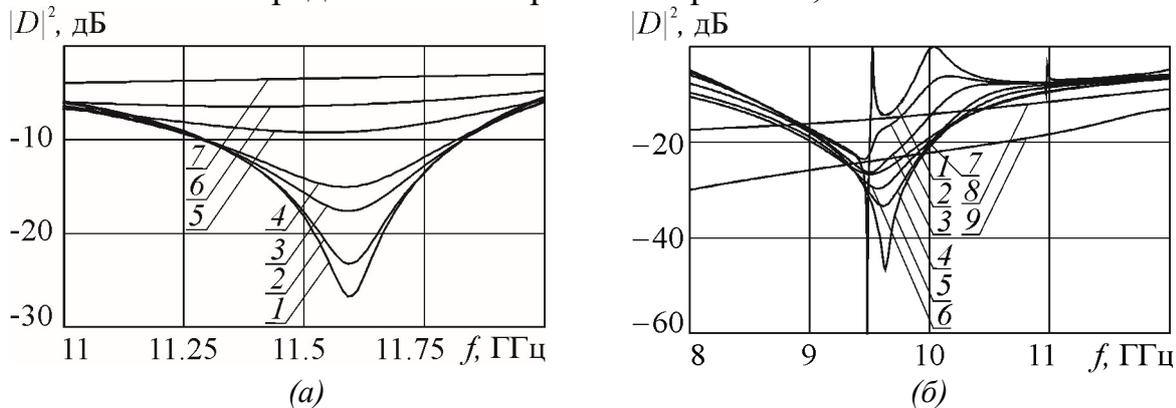


Рис. 7. Расчетные частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой а) при частичном заполнении поперечного сечения волновода: 1 - пластина поликора без металлической пленки, 2 - $t=1$ нм, 3 - $t=3$ нм, 4 - $t=4$ нм, 5 - $t=7$ нм, 6 - $t=13.5$ нм, 7 - $t=40$ нм; б) при размещении под углом к узким стенкам волновода: 2 - $t=1$ нм, 3 - $t=2$ нм, 4 - $t=3$ нм, 5 - $t=7$ нм, 6 - $t=10$ нм, 7 - $t=13.5$ нм, 8 - $t=40$ нм, 9 - $t=80$ нм, $\psi=39^\circ$.

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.

Измерения частотных зависимостей $|D|^2(f)$ электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой, проводились с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA N5230A.

Толщины металлических слоев (TaAlN), нанесенных на поликоробые подложки, были измерены с помощью атомно-силового микроскопа Agilent 5600LS AFM, а их удельная электропроводность определялась с использованием зондовой станции JANDEL RMS-EL-Z.

Результаты измерений квадратов модулей коэффициента прохождения на фиксированной частоте $f=11.6$ ГГц при частичном заполнении поперечного сечения волновода структурой представлены на рис. 8. На этом же рисунке приведены расчетные данные.

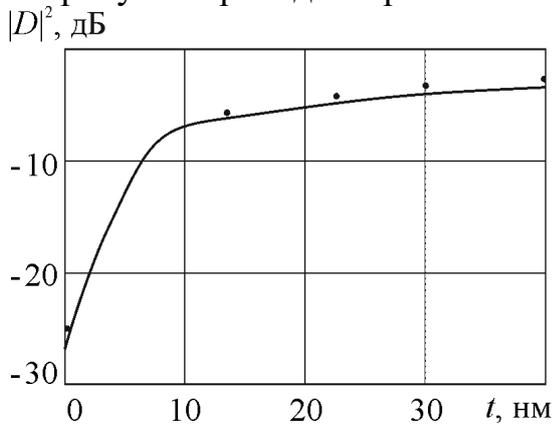


Рис. 8 Расчетная (линия) и экспериментальная (точки) зависимости $|D|^2(f)$ от толщины металлической пленки на фиксированной частоте $f=11.6$ ГГц

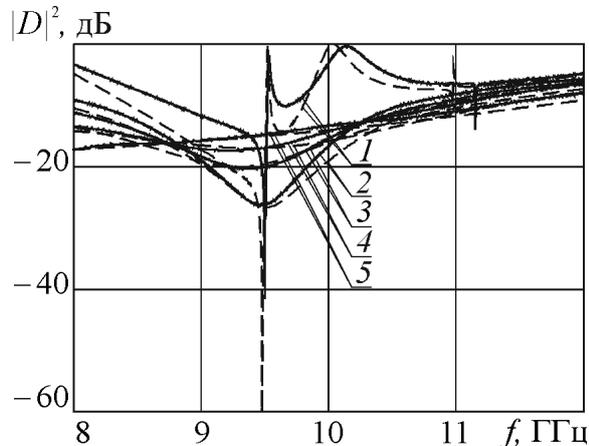


Рис. 9 Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые линии) частотные зависимости $|D|^2(f)$: 1– пластина поликора без металлического слоя; 2 – $t=13.5$ нм, $\sigma=1.38 \cdot 10^5$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$; 3 – $t=22.6$ нм, $\sigma=1.4 \cdot 10^5$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$; 4 – $t=30.0$ нм, $\sigma=1.658 \cdot 10^5$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$; 5 – $t=40.0$ нм, $\sigma=2.638 \cdot 10^5$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$.

Измеренные и расчетные частотные зависимости $|D|^2(f)$ электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой, расположенной перпендикулярно широкому и под углом к узким стенкам волновода при различных значениях толщины и удельной электропроводности нанометрового металлического слоя представлены на рис. 9. Расчетная чувствительность $d(|D|^2)/dt$ в диапазоне толщин 0–1 нм достигает 36.8 дБ/нм.

В заключении приведены основные результаты и сформулированы выводы научной квалификационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

- 1 Представлено теоретическое обоснование методов одновременного определения удельной электропроводности подложки полупроводниковой структуры, толщины и удельной электропроводности сильнолегированного эпитаксиального слоя в полупроводниковых n^+n -структурах, выполняющих роль нарушения периодичности в одномерном волноводном СВЧ фотонном кристалле, по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения на основе решения обратной задачи.
- 2 Представлено теоретическое обоснование методов одновременного определения толщины подложки полупроводниковой структуры, толщины и удельной электропроводности сильнолегированного эпитаксиального слоя в полупроводниковых n^+n -структурах и в структурах с полуизолирующей подложкой, выполняющих роль нарушения периодичности в одномерном волноводном СВЧ фотонном кристалле, по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения на основе решения обратной задачи.
- 3 Экспериментально реализованы методы 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 СВЧ фотонном кристалле, по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения.
- 4 Разработан и экспериментально реализован модифицированный метод 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.
- 5 Представлено теоретическое обоснование высокочувствительных методов измерения параметров нанометрового металлического слоя, нанесенного на диэлектрическую подложку, при возникновении в электродинамической системе волноводно-диэлектрического резонанса в случае размещения металлодиэлектрической структуры в волноводе асимметрично относительно его середины, полностью заполняющей его по высоте и частично по ширине, или при размещении металлодиэлектрической структуры в волноводе перпендикулярно широким и под углом к его узким стенкам симметрично относительно продольной оси волновода.
- 6 Теоретически обоснован эффект резонансного поглощения мощности СВЧ-излучения в нанометровом слое металла толщиной менее 7.0 нм при возникновении в электродинамической системе волноводно-диэлектрического резонанса в случае размещения металлодиэлектриче-

ской структуры в волноводе под углом к его узким стенкам симметрично относительно продольной оси волновода.

- 7 Экспериментально обоснованы методы измерения параметров нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрическую подложку, с использованием волноводно-диэлектрического резонанса.
- 8 На основании полученных результатов подана заявка на патент на изобретение: «Способ измерения параметров полупроводниковых структур».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В., Латышева Е. В. Многопараметровые измерения эпитаксиальных полупроводниковых структур с использованием одномерных сверхвысокочастотных фотонных кристаллов // Радиотехника и электроника. 2016, том. 61. № 1. С. 45–53.
2. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В. Измерения электрофизических характеристик полупроводниковых структур с использованием СВЧ фотонных кристаллов // Известия вузов. Электроника. 2016. №2. С. 187–194.
3. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В., Феклистов В.Б. Волноводно-диэлектрический резонанс в системе с нанометровым металлическим слоем на диэлектрической подложке // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2016. Т. 16. Вып. 2. С. 86–90.
4. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В. Использование волноводно-диэлектрического резонанса для измерения параметров структуры «нанометровая металлическая пленка – диэлектрик» // Радиотехника. 2016. № 7. С. 10–16.

В других изданиях

5. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В. Применение СВЧ фотонных кристаллов для измерения параметров тонких полупроводниковых слоёв / Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: материалы Всерос. научной школы-семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. – Саратов: изд-во Саратовский источник, 2014. С. 27–30.
6. D. Usanov, A. Skripal, D. Ponomarev, E. Latysheva, S. Nikitov New Techniques of Measurement Parameters of Thin Semiconductor Layers by means of Microwave Photonic Crystals // Proc. of 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications MIKON-2014, Gdansk, Poland, June 16–18, 2014. V.1. P. 62–64.
7. Usanov D. A., Skripal A. V., Ponomarev D. V., Latysheva E. V. Multiparameter Diagnostic of Semiconductor Layers by use of Microwave Waveguide Photonic Crystals // Материалы 24-ой Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2014). Севасто-

- поль, 7—13 сентября 2014 г.: Материалы конференции. В 2 т. Севастополь: «Вебер», 2014, Т. 2, С. 906–907.
8. D.A. Usanov, A.V. Skripal, D.V. Ponomarev, E.V. Latysheva, S.A. Nikitov Microwave Photonic Structures and their Application for Measurements of Parameters of Thin Semiconductor Layers // Proceedings of the 44th European Microwave Conference. 6–9 Oct 2014, Rome, Italy. P. 984–987.
 9. Usanov D.A., Nikitov S.A., Skripal A.V., Ponomarev D.V., Latysheva E.V. Photonic band gap structures and their application for measuring parameters of semiconductor layers // Proceedings of the Microwave Symposium (IMS), 2015 IEEE MTT-S International. 17–22 May 2015, Phoenix, AZ, USA. P.1–4.
 10. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В. Измерения параметров полупроводниковых структур с использованием СВЧ фотонных кристаллов // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Электроника 2015». Зеленоград, 19–20 ноября 2015 г. С. 35–36.
 11. Усанов Д.А., Мерданов М.К., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В. Использование СВЧ фотонных кристаллов для измерения параметров материалов // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: материалы Всерос. научной школы-семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. – Саратов: изд-во Саратовский источник, 2015. С. 50–55.
 12. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В. Контроль параметров структуры нанометровая металлическая пленка-диэлектрик методом волноводно-диэлектрического резонанса // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: материалы Всерос. научной школы-семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. – Саратов: изд-во Саратовский источник, 2016. С. 121–124.
 13. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В., Феклистов В.Б. Использование волноводно-диэлектрического резонанса для измерения параметров нанометровых металлических пленок в слоистых структурах // Труды V Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 30 мая–2 июня 2016 г. С 290–294.
 14. D.A. Usanov, A.V. Skripal, D.V. Ponomarev, E.V. Latysheva, S.A. Nikitov. Multiparameter Measurements of Characteristics of Semiconductor Structures Using Microwave Photonic Crystals // Proc. of 21th International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON) 2016, Krakow, Poland, May 9-12, 2016. P. 1–4. ISBN: 978-1-5090-2213-7.
 15. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В., Феклистов В.Б. Измерение параметров нанометровых металлических пленок в слоистых структурах с использованием волноводно-диэлектрического резонанса // Материалы 26-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016). Севастополь, 4—10 сентября 2016 г.: материалы конф. в 13 т. — Москва; Минск; Севастополь, 2016. Т. 9, 226 с. С. 2023—2029.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Yablonovitch E., Gmitter T.J., Meade R.D. Donor and acceptor modes in photonic band structure // *Phys. Rev. Lett.* 1991. Vol. 67, no. 24. P. 3380–3383.
2. Беляев Б. А., Волошин А. С., Шабанов В. Ф. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах // *Доклады Академии Наук.* 2005. Т. 400, № 2. С. 181–185.
3. Никитов С.А., Гуляев Ю.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. Определение проводимости и толщины полупроводниковых пластин и нанометровых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов // *Доклады Академии Наук.* Т. 448, № 1, Январь 2013. С. 35–37.
4. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Эффекты ближнего поля в электродинамических системах с неоднородностями и их использование в технике СВЧ. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2011. 392 с.