

На правах рукописи

ПОНОМАРЕВ ДЕНИС ВИКТОРОВИЧ

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ
С ФОТОННЫМИ КРИСТАЛЛАМИ, СОДЕРЖАЩИМИ
В КАЧЕСТВЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ,
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Научные руководители:

заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор

Усанов Дмитрий Александрович

доктор физико-математических наук, профессор

Скрипаль Александр Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Роках Александр Григорьевич, профессор кафедры физики полупроводников Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

доктор физико-математических наук, профессор

Попов Вячеслав Валентинович, заведующий лабораторией фотоники Саратовского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Ведущая организация: Закрытое акционерное общество «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г. Саратов

Защита диссертации состоится 23 ноября 2012 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 в Саратовском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, III корп., ауд. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета (Саратов, ул. Университетская, 42).

Автореферат разослан « ____ » октября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Аникин Валерий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В настоящее время одной из наиболее интенсивно развивающихся областей науки является направление по созданию и исследованию свойств метаматериалов. Метаматериалы представляют собой искусственно созданные гетерогенные среды, в которых геометрические размеры и электрофизические параметры специально подобранных составляющих элементов периодически изменяются вдоль одного или нескольких пространственных направлений. К метаматериалам относится класс фотонных кристаллов – искусственных периодических структур с периодом, сравнимым с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения [1, 2]. По аналогии с реальными кристаллами, в которых существуют разрешенные и запрещенные энергетические состояния для электронов в периодическом потенциале кристаллической решетки, в фотонном кристалле существуют разрешенные и запрещенные для распространения электромагнитного излучения частотные области. Появление нарушения периодичности фотонного кристалла, в виде изменения геометрических размеров и/или электрофизических параметров одного или нескольких слоев, приводит к возникновению в запрещенной зоне фотонного кристалла узкого «окна прозрачности» – частотной области с минимальным значением коэффициента отражения электромагнитной волны [3, 4]. При изменении электрофизических параметров и геометрических размеров нарушения периодичности происходит частотный сдвиг и изменение формы «окна прозрачности» в фотонной запрещенной зоне фотонного кристалла.

В СВЧ-диапазоне фотонные кристаллы создаются на основе упорядоченных массивов элементов различной формы и конфигурации, волноводов с диэлектрическим заполнением и планарных линий передачи [5, 6]. Исследование СВЧ фотонных кристаллов имеет важное практическое значение для разработки современных телекоммуникационных систем, приемо-передающих устройств и контрольно-измерительного оборудования для проведения высокоточных бесконтактных неразрушающих измерений электрофизических параметров металлических, диэлектрических и полупроводниковых материалов и структур, композитов, используемых в микро-, нано-, и СВЧ-электронике.

Известно, что многослойные волноводные структуры используются для реализации методов по одновременному определению нескольких параметров металлических и полупроводниковых слоев, однако, они или не позволяют определять параметры, оба из которых соответствуют одному и тому же слою, или же разрешающая способность методов недостаточна для измерения нанометровых слоев, которые используются как основа для создания современных устройств микро- и наноэлектроники [7].

В связи с этим является актуальным проведение исследований особенностей взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами, определение чувствительности частотной зависимости «окон прозрачности» в запрещенной зоне фотонного кристалла к параметрам нарушения периодичности, реализация, установление возможности расширения диапазона и повышение достоверности измерений слоев параметров диэлектрических, полупроводниковых и металли-

ческих материалов, включенных в состав одномерных волноводных фотонных кристаллов в качестве нарушений периодичности, по спектрам отражения и прохождения взаимодействующего с ними излучения сверхвысокочастотного диапазона длин волн.

Цель диссертационной работы:

Выявление особенностей взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами, содержащими неоднородности в виде диэлектрических, полупроводниковых и металлических слоев и наноструктур, и проведение на этой основе экспериментального и теоретического обоснования возможности одновременного измерения их толщины и электропроводности, комплексной диэлектрической проницаемости в широком диапазоне значений.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

Разработка модели, которая позволяет адекватно описать взаимодействие электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами с периодически изменяющейся длиной и диэлектрической проницаемостью слоев и содержащими нарушения периодичности в виде измененной длины центрального слоя с введенной в нарушенный слой полупроводниковой или диэлектрической структурой и расположенной после фотонного кристалла нанометровой металлической пленки на диэлектрической подложке.

Исследование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с одномерными волноводными фотонными кристаллами СВЧ-диапазона, содержащими нарушения периодичности в виде измененной длины центрального слоя, введенной в нарушенный слой диэлектрической или полупроводниковой структурой и расположенной после фотонного кристалла нанометровой металлической пленки на диэлектрической подложке.

Разработка методов решения обратной задачи: определение толщины и электропроводности полупроводниковых структур, комплексной диэлектрической проницаемости диэлектрических и полупроводниковых слоев, электропроводности тонких нанометровых металлических пленок по измеренным частотным зависимостям коэффициента отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом, определение границ применимости методов измерения и диапазонов измеряемых величин.

Экспериментальная реализация методов одновременного измерения толщины и электропроводности полупроводниковых структур, комплексной диэлектрической проницаемости диэлектрических и полупроводниковых слоев, выполняющих роль неоднородности в волноводных фотонных кристаллах, и электропроводности тонких нанометровых металлических пленок по спектрам отражения и прохождения взаимодействующего с ними электромагнитного излучения СВЧ-диапазона.

Новизна исследований, проведенных в ходе диссертационной работы, состоит в следующем:

Установлен факт увеличения чувствительности коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с одномерным волноводным фотонным кристаллом, к изменению толщины и электропроводности полупроводниковой структуры, введённой в нарушенный слой, при перемещении полупроводниковой структуры от середины нарушенного слоя к его границам.

Разработано теоретическое обоснование возможности расширения диапазона измеряемых толщин и электропроводностей полупроводниковых пластин и структур с нанометровыми слоями в случае, когда они играют роль неоднородности структуры одномерного волноводного фотонного кристалла, с использованием спектров отражения и прохождения взаимодействующего с фотонным кристаллом излучения СВЧ-диапазона, измеренных при двух температурах.

Разработано теоретическое обоснование возможности одновременного измерения параметров полупроводниковых пластин и структур с нанометровыми слоями, выполняющих роль неоднородности структуры волноводного фотонного кристалла, по спектрам отражения и прохождения, взаимодействующего с фотонным кристаллом сверхвысокочастотного излучения, измеренных при различных позициях измеряемого образца внутри фиксированной неоднородности или при фиксированной позиции измеряемого образца и различных длинах неоднородности.

Экспериментально реализованы методы одновременного измерения толщины и электропроводности полупроводниковых пластин и структур с нанометровыми слоями, выполняющих роль неоднородности волноводного фотонного кристалла, по спектрам отражения и прохождения взаимодействующего с фотонным кристаллом электромагнитного излучения.

Достоверность результатов диссертации 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:

Реализован метод компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения фотонных кристаллов, реализованных на основе волновода, содержащего периодически чередующиеся диэлектрические слои.

Разработана программная и аппаратная реализация методов одновременного измерения толщины и электропроводности полупроводниковых пластин и структур с нанометровыми слоями с использованием волноводных фотонных кристаллов, по спектрам прохождения и отражения взаимодействующего с фотонным кристаллом электромагнитного излучения.

Основные положения, выносимые на защиту:

Чувствительность коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с одномерным волноводным фотонным кристаллом, к изменению толщины и электропроводности полупроводниковой структуры, введённой в нарушенный слой, зависит от её позиции внутри нарушенного слоя. В случае, когда нарушенным слоем является центральный слой фотонного кристалла, чувствительность достигает максимального значения при расположении полупроводниковой структуры у границ нарушенного слоя.

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 введённой в нарушенный слой полупроводниковой структуры, в результате решения обратной задачи при известных параметрах периодически чередующихся слоев возможно определение параметров полупроводниковой структуры в диапазоне толщин от 100 нм до 500 мкм и электропроводностей от $1,0 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ до $1000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, при двух фиксированных температурах.

По измеренным частотным зависимостям коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с волноводным фотонным кристаллом, при двух различных фиксированных расстояниях от введённой полупроводниковой структуры до границы нарушенного слоя или при двух различных длинах слоя, нарушающего периодичность, в результате решения обратной задачи при известных параметрах периодически чередующихся слоев возможно одновременное определение толщины и электропроводности сильнолегированного слоя на полуизолирующей подложке.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы доложены на:

- Всероссийской молодежной выставке-конкурсе прикладных исследований, изобретений и инноваций. Саратов, Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, 27—28 октября 2009 г.;
- VII Международной российско-казахстанско-японской научной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов». Волгоград, 3—4 июня 2009 г.;
- 19-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии КрыМиКо—2009». Севастополь, Крым, Украина, 14—18 сентября 2009 г.;
- 39th European Microwave Conference. Rome, Italy, 29 September—1 October 2009;
- 18th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications “MIKON—2010”. Vilnius, Lithuania, June 14—16 2010;
- 20-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии КрыМиКо—2010». Севастополь, Крым, Украина, 13—17 сентября 2010 г.;
- 19th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON-2012. Warsaw, Poland, May 21—23, 2012;
- International Conference ‘Days of Diffraction 2012’, Saint-Petersburg, May 28 – June 1, 2012;

- 22-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии КрыМиКо—2012». Севастополь, Крым, Украина, 10—14 сентября 2012 г.

Исследования выполнялись в рамках НИР «Технология формирования наноструктур и нанокompозитов, разработка и создание новых технологий измерений параметров материалов, наноструктур и нанокompозитов на основе низкоразмерных резонансных систем оптического и микроволнового диапазонов» ГК № 02.513.11.3058, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2012 годы», НИР «Разработка новых высокочувствительных методов измерения электрических и магнитных свойств нанокompозитных материалов и структур в СВЧ и оптическом диапазонах и создание компьютерного диагностического комплекса для их реализации» (грант Президента РФ для поддержки молодых ученых — докторов наук и кандидатов наук и их научных руководителей (МК-415.2009.8), НИР «Разработка технологии формирования нанокompозитов на основе диэлектрических матриц с включениями в виде углеродных нанотрубок с управляемыми характеристиками в СВЧ-диапазоне и создание сканирующего зондового ближнеполевого СВЧ-микроскопа, обеспечивающего локальное измерение СВЧ-характеристик нанокompозитов», ГК № 16.740.11.0512, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, гранта Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования ГК № 11.G34.31.0030, НИОКР «Разработка сенсоров на основе СВЧ фотонных кристаллов» по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») 2009 ГК № 7379p /10164.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано работ 14, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК; 9 работ опубликованы в трудах международных и Всероссийских конференций, 1 патент РФ на изобретение.

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 диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 139 страницах, содержит 69 рисунков и список литературы из 152 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе проведен критический анализ современного состояния исследований СВЧ-фотонных кристаллов.

Во втором разделе представлена теоретическая модель, описывающая взаимодействие электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами, содержащими нарушения пространственной периодичности параметров структур, и позволяющая рассчитывать коэффициенты отражения и прохождения СВЧ-излучения. Представлены результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения одномерных волноводных фотонных кристаллов при изменении длины центрального

нарушенного слоя, электрофизических параметров и положения полупроводниковой структуры, помещенной в нарушенный слой.

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 :

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

Проводилось компьютерное моделирование изменения позиции полупроводникового слоя внутри нарушенного центрального (шестого) слоя одномерного волноводного фотонного кристалла. Полупроводниковый слой (кремний) толщиной 200 нм и электропроводностью $1000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, нанесенный на полупроводниковую подложку (кремний) толщиной 100 мкм и электропроводностью $0,1 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, помещался между шестым (воздух или пенопласт) и седьмым (поликор) слоями, как показано на рис. 1.

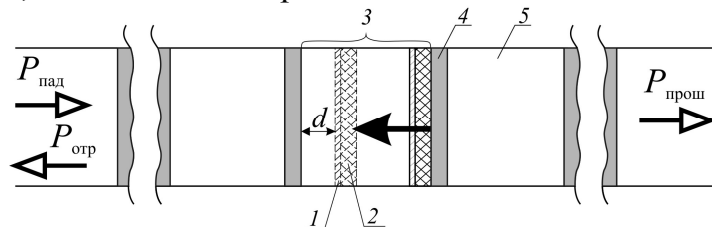


Рис. 1 Волноводный фотонный кристалл с нарушением периодичности в виде измененной длины центрального слоя и введенной полупроводниковой структурой в случае ее перемещения внутри нарушенного слоя: 1–тонкий слой кремния, 2–высокоомная кремниевая подложка, 3–нарушенный центральный слой, 4– слой поликора (Al_2O_3) или пенопласта, 5 – воздушный слой. Стрелка показывает направление перемещения полупроводниковой структуры.

В ходе компьютерного моделирования толщина нарушенного слоя выбиралась равной 4 мм, расстояние d уменьшалось от 4 до 2 мм.

Изменение толщины и электропроводности полупроводникового слоя приводит к изменению коэффициентов отражения и прохождения в области «окна прозрачности». Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 2. При этом чувствительность коэффициента прохождения к изменению электрофизических параметров полупроводникового слоя определяется позицией полупроводниковой структуры внутри нарушения и составляет 0,034 дБ/нм, 40 кГц/нм в диапазоне толщин 10–100 нм и 10^{-2} дБ/ $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, 10 кГц/ $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ в диапазоне электропроводностей 10^2 – $10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ при расположении структуры у пра-

вой границы нарушенного слоя фотонного кристалла и менее 0,002 дБ/нм, 100 Гц/нм и 10^{-4} дБ/Ом⁻¹м⁻¹, 100 Гц/Ом⁻¹м⁻¹ при расположении слоя в центре нарушения.

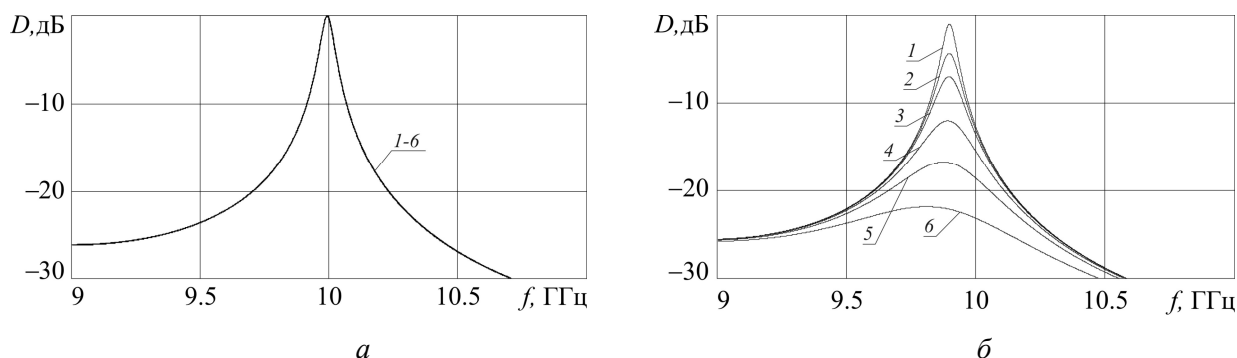


Рис. 2 Частотные зависимости коэффициентов прохождения вблизи «окна прозрачности» фотонного кристалла «поликор–воздух», содержащего двухслойную полупроводниковую структуру, расположенную внутри нарушенного слоя фотонного кристалла в центре нарушения (рис. 2, а $d=2$ мм) и у его правой границы (рис. 2, б $d=4$ мм), при изменении электропроводности полупроводникового слоя: 1 – $\sigma = 100$ Ом⁻¹м⁻¹, 2 – $\sigma = 500$ Ом⁻¹м⁻¹, 3 – $\sigma = 1000$ Ом⁻¹м⁻¹, 4 – $\sigma = 2000$ Ом⁻¹м⁻¹, 5 – $\sigma = 5000$ Ом⁻¹м⁻¹, 6 – $\sigma = 10000$ Ом⁻¹м⁻¹.

В третьем разделе предложено теоретическое обоснование трех методов одновременного определения толщины и электропроводности полупроводниковых слоев, комплексной диэлектрической проницаемости диэлектрических и полупроводников слоев, электропроводности нанометровых металлических пленок по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения с использованием одномерных волноводных фотонных кристаллов.

Для устранения неоднозначности, связанной с существованием различных сочетаний значений толщины и электропроводности при которых наблюдается одинаковые частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения СВЧ – излучения, при решении обратной задачи по одновременному определению электропроводности и толщины полупроводниковых слоев, используется тот факт, что температурная зависимость электропроводности полупроводников хорошо изучена, а изменением толщины в ограниченных температурных интервалах можно пренебречь. Диапазон измеряемых толщин можно существенным образом расширить, если использовать фотонные кристаллы, частотные характеристики которых обладают высокой чувствительностью к изменению этих параметров.

Для нахождения искомого толщины t и электропроводности σ исследуемого образца по частотным зависимостям $D(f)$ и $R(f)$ был использован метод наименьших квадратов, при реализации которого находится такое значение параметров $t_{иск}$ и $\sigma_{иск}$, при котором сумма $S(t_{иск}, \sigma_{иск})$ квадратов разностей расчетных, $D(f, t_{иск}, \sigma_{иск})$ и $R(f, t_{иск}, \sigma_{иск})$, и экспериментальных, $D_{эксп}$ и $R_{эксп}$, значений коэффициентов пропускания и отражения, измеренных при температурах T_0 и T исследуемого образца

$$S(t, \sigma) = \sum \left(\left(D(f, t, \sigma(T_0)) - D_{T_0,эксп} \right) + \left(R(f, t, \sigma(T_0)) - R_{T_0,эксп} \right) \right)^2 + \left(\left(D(f, t, \sigma(T)) - D_{T,эксп} \right) + \left(R(f, t, \sigma(T)) - R_{T,эксп} \right) \right)^2, \quad (3)$$

становится минимальной.

Искомые значения толщины и электропроводности исследуемого образца определяются численным методом в результате решения системы уравнений:

$$\frac{\partial S(\sigma)}{\partial \sigma} = 0, \frac{\partial S(t)}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

При решении обратной задачи по предложенной методике использовалось соотношение, связывающее проводимость $\sigma_{\text{пп}}(T)$ при температуре T с проводимостью σ_0 при температуре T_0 , в случае, когда преобладает рассеяние свободных носителей заряда в полупроводнике на фононах, в виде:

$$\sigma_{\text{пп}}(T) = \frac{T^{-3/2}}{T_0^{-3/2}} \sigma_0. \quad (5)$$

Данные для решения тестовых задач задавались в виде значений коэффициентов пропускания и отражения исследуемой структуры, содержащей слой кремния различной толщины, полученных из выражений (2) с погрешностью $\pm 1\%$. Тестовые спектры отражения и прохождения соответствуют температурам 298°K и 318 K, изменение температуры составляет 20 K.

Из результатов расчета, может быть сделано заключение о возможности расширения диапазона измеряемых толщин до 100 нм, а электропроводностей до $1000 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$, при использовании одномерных волноводных фотонных кристаллов, содержащих полупроводниковые слои в виде нарушения периодичности.

Для реализации способа измерения проводимости и толщины при фиксированной температуре предлагается использовать фотонные структуры, в которых допускается возможность изменения положения образца и размеров нарушения периодичности структуры фотонного кристалла, содержащего исследуемый полупроводниковый образец.

В этом случае для нахождения толщины t и электропроводности σ исследуемого образца по частотным зависимостям $D_{1,2}(f)$ и $R_{1,2}(f)$ используется метод наименьших квадратов, при реализации которого находится такое значение параметров $t_{\text{иск}}$ и $\sigma_{\text{иск}}$, при котором сумма $S(t_{\text{иск}}, \sigma_{\text{иск}})$ квадратов разностей расчетных и экспериментальных значений коэффициентов прохождения и отражения, измеренных при двух различных фиксированных расстояниях от полупроводникового слоя до границы нарушенного центрального слоя фотонного кристалла, становится минимальной.

При реализации метода одновременного определения толщины и электропроводности полупроводниковых структур, основанного на перемещении образца внутри нарушенного слоя, была осуществлена его модификация, заключающаяся в изменении длины нарушенного слоя для разрешения проблемы, связанной с точностью позиционирования образца в нарушенном слое фотонного кристалла.

Способ заключается в проведении измерений при постоянной температуре и на одном фиксированном расстоянии от полупроводникового слоя до границы нарушенного центрального слоя фотонного кристалла, но при двух различных длинах слоя с нарушенной периодичностью фотонного кристалла. В этом случае для нахождения толщины t и электропроводности σ исследуемого образца по частотным зависимостям $D(f)$ и $R(f)$ используется метод наименьших квадра-

тов, при реализации которого находится такое значение параметров $t_{иск}$ и $\sigma_{иск}$, при котором сумма $S(t_{иск}, \sigma_{иск})$ квадратов разностей расчетных и экспериментальных значений коэффициентов пропускания и отражения, измеренных при двух различных значениях толщины центрального нарушенного слоя фотонного кристалла, становится минимальной.

Результаты расчета и визуализации функции невязки для различных сочетаний электропроводности и толщины демонстрируют изменение конфигурации глобального минимума функции невязки, соответствующего искомым параметрам. При толщинах слоев от 100 до 500 мкм и электропроводности от 1 до $10 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ наблюдается конфигурация минимума в виде концентрически сходящихся в плоскости окружностей (рис. 3, а). При уменьшении толщины слоя (менее 100 мкм) и увеличении электропроводности (более $100 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$) наблюдается конфигурация минимума в виде концентрически сходящихся замкнутых траекторий эллиптической в плоскости формы, вытянутых вдоль оси электропроводности (рис. 3, б). При дальнейшем уменьшении толщины до 100 нм и увеличении электропроводности до $1000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ происходит трансформация глобального минимума в замкнутые концентрически сходящиеся гиперболической в плоскости формы замкнутые траектории (рис. 3, в). При толщинах менее 100 нм и электропроводности более $1000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ глобальный минимум исчезает и превращается в вытянутую область гиперболической в плоскости формы, в границах которой находятся значения искомым параметров (рис. 3, г). Так как дно данной области имеет чрезвычайно малую кривизну и имеет близкую к плоской форму в координатах (t, σ) , определение толщины и электропроводности в окрестности этих значений (t, σ) не представляется возможным.

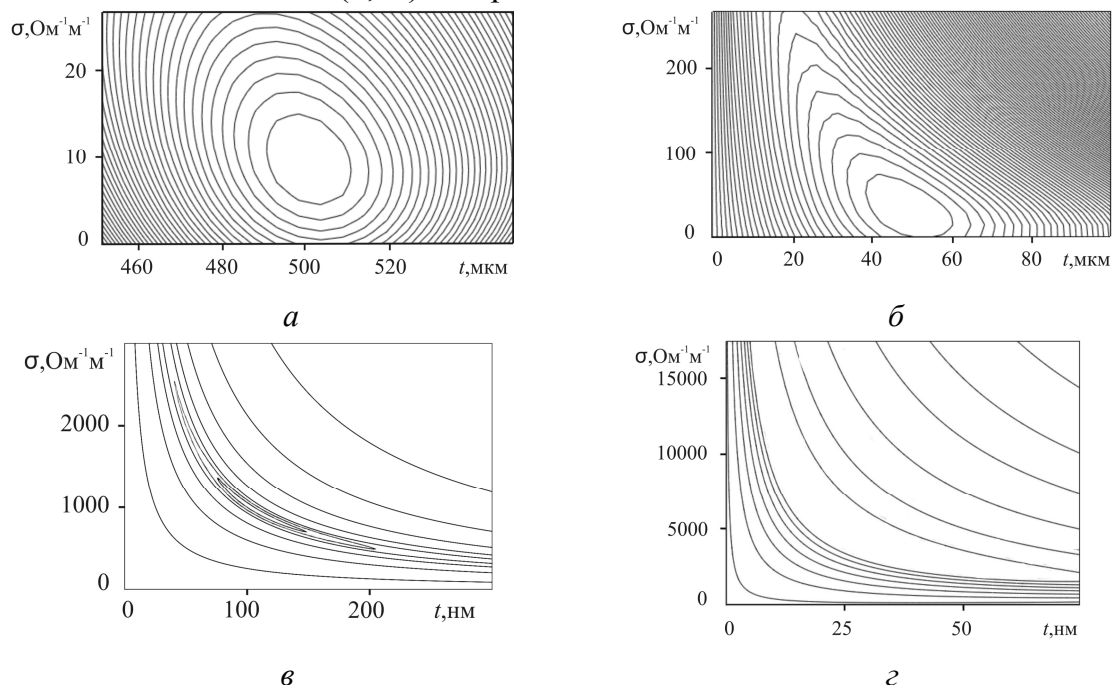


Рис. 3 Изменение функции невязки и положения глобального минимума при изменении толщины и электропроводности полупроводникового слоя

В ходе проведения модельного эксперимента для определения максимальной разрешающей способности метода в качестве измеряемого объекта использовалась широко применяемая полупроводниковая двухслойная структура в виде

сильно легированного кремниевого слоя, сформированного на полуизолирующей кремниевой подложке. Толщина полупроводникового слоя в исследуемой структуре составляла 0,1 мкм, а его удельная электропроводность $1000,0 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, толщина подложки – 100,0 мкм, удельная электропроводность подложки – $0,1 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.

Рассчитанные значения искомым толщины t и электропроводности σ полупроводникового слоя составляют: $t_{иск} = 101 \text{ нм}$, $\sigma_{иск} = 1018 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. Относительная погрешность определения толщины образца по тестовым данным составила $\pm 1 \%$, электропроводности $\pm 1,8 \%$.

При реализации метода определения комплексной диэлектрической проницаемости полупроводниковых и диэлектрических слоёв, а также толщины нанометровых металлических плёнок, нанесенных на изолирующую подложку, был применен метод, основанный на использовании частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения СВЧ – излучения, измеренных при различных длинах нарушенного слоя фотонного кристалла.

В четвертом разделе приведены результаты экспериментального исследования взаимодействия СВЧ-излучения с одномерными волноводными фотонными кристаллами и их использования для измерения электропроводности и толщины полупроводниковых слоев, комплексной диэлектрической проницаемости диэлектрических и полупроводников слоев, электропроводности нанометровых металлических пленок. Представлены экспериментально измеренные спектры прохождения и отражения в СВЧ-диапазоне одномерных волноводных фотонных кристаллов, содержащих нарушения периодичности в виде измененной длины центрального слоя и введенной в нарушенный слой полупроводниковой структуры, в виде измененной длины центрального слоя и помещенной после фотонного кристалла металлической пленки на диэлектрической подложке. Проведены одновременные измерения толщины и электропроводности, диэлектрической проницаемости полупроводниковых пластин и электропроводности нанометровых металлических пленок.

Изменение длины центрального нарушенного слоя фотонного кристалла, приводящее к частотному сдвигу положения «окна прозрачности» позволяет однозначно определить толщину и электропроводность полупроводниковой пластины из решения обратной задачи. Из результатов обработки экспериментально полученных спектров отражения и прохождения следует, что функция невязки $S(t, \sigma)$, представленная на рис. 4, а, для случая, когда толщина полупроводниковой пластины в исследуемой периодической структуре составляет 454 мкм, а ее электропроводность $6,71 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, обладает ярко выраженным глобальным минимумом в пространстве координат $(t, \sigma, S(t, \sigma))$, а контурная карта, представленная на рис.4, б, характеризуется наличием замкнутых траекторий вблизи минимума, что подтверждает возможность однозначно определять толщину и электропроводность полупроводникового слоя.

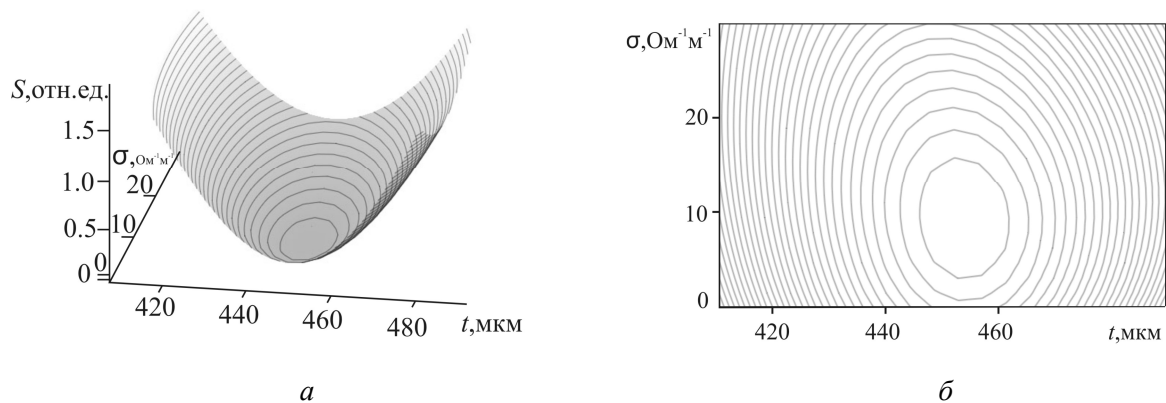


Рис. 4 Функция невязки $S(t, \sigma)$ в пространстве искомых параметров полупроводниковой пластины (а) и контурные карты функции невязки $S(t, \sigma)$ в плоскости искомых параметров полупроводниковой пластины, полученные с использованием найденных значений параметров $t_{иск} = 454$ мкм и $\sigma_{иск} = 6,71$ Ом⁻¹м⁻¹

На рис. 5 представлены экспериментальные (точки) и рассчитанные (линии) частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения фотонной структуры при значениях толщины $t_{иск} = 454$ мкм и электропроводности $\sigma_{иск} = 6,71$ Ом⁻¹м⁻¹ измеряемой полупроводниковой пластины, определённых из решения обратной задачи, при фиксированной температуре 298°К и двух значениях длины нарушенного шестого (воздушного) слоя фотонного кристалла.

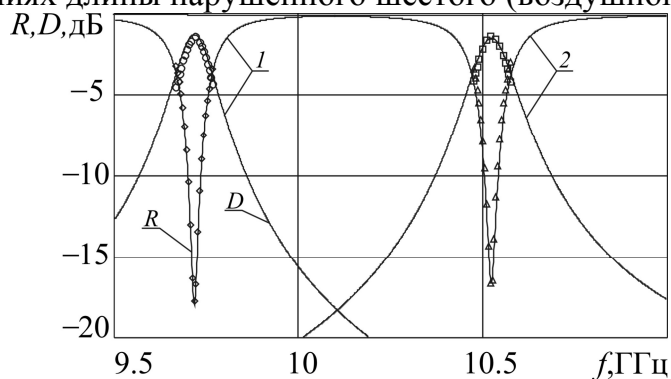


Рис. 5 Частотные зависимости экспериментальных (точки) и рассчитанных (линии) значений коэффициентов отражения R и прохождения D , полученные с использованием найденных значений параметров $t_{иск} = 454$ мкм и $\sigma_{иск} = 6,71$ Ом⁻¹см⁻¹ для структур с различным нарушенным воздушным слоем: 1– 4 мм, 2– 2 мм

Значения толщины и электропроводности исследуемой полупроводниковой пластины, измеренные независимыми методами, составляли соответственно 451 мкм и 6,46 Ом⁻¹м⁻¹.

Экспериментально была измерена комплексная диэлектрическая проницаемость полупроводниковой пластины. Из результатов обработки экспериментальных спектров отражения и прохождения была построена функция невязки $S(\epsilon, \sigma)$, представленная на рис. 6, а, для случая, когда диэлектрическая проницаемость полупроводниковой пластины в исследуемой периодической структуре составляет 11,7, а ее электропроводность 6,71 Ом⁻¹м⁻¹, обладает ярко выраженным глобальным минимумом в пространстве координат $(\epsilon, \sigma, S(\sigma))$, а контурная карта, представленная на рис.6, б, характеризуется наличием замкнутых траекторий вблизи минимума, что подтверждает возможность однозначно определять толщину и электропроводность полупроводникового слоя.

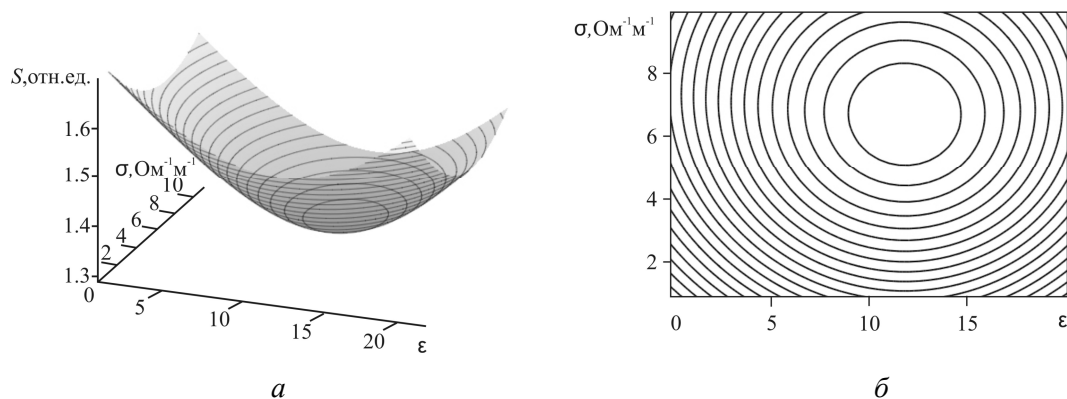


Рис. 6 Функция невязки $S(\varepsilon, \sigma)$ в пространстве искомых параметров полупроводниковой пластины (а) и контурные карты функции невязки $S(\varepsilon, \sigma)$ в плоскости искомых параметров полупроводниковой пластины, полученные с использованием найденных значений параметров $\varepsilon_{иск} = 11,7$ и $\sigma_{иск} = 6,71 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

Значения диэлектрической проницаемости и электропроводности исследуемой полупроводниковой пластины, измеренные независимыми методами, составляли соответственно $11,58$ и $6,46 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.

Экспериментально была измерена электропроводность тонкой нанометровой металлической пленки. При решении обратной задачи были использованы спектры отражения и прохождения, измеренные при двух длинах центрального нарушенного слоя фотонного кристалла и её фиксированном расположении после фотонного кристалла. На рис. 7 представлены экспериментальные (точки) и рассчитанные (линии) частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения фотонной структуры при значении электропроводности $\sigma_{иск} = 1.15 \times 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ измеряемой тонкой металлической пленки, определённого из решения обратной задачи, при фиксированной температуре 298°К и двух значениях длины нарушенного шестого (воздушного) слоя фотонного кристалла.

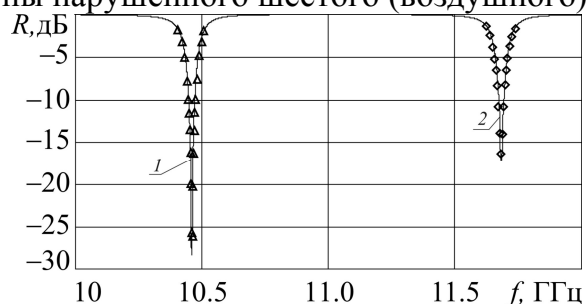


Рис. 7 Частотные зависимости тестовых (точки) и рассчитанных (линия) значений коэффициента отражения, полученные с использованием найденного значения $\sigma_{иск} = 1.15 \times 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ для структур с различным нарушенным воздушным слоем: 1– 3,9 мм, 2– 2,3 мм

Приведены экспериментальные измерения комплексной диэлектрической проницаемости ряда жидких диэлектриков (водноэтанольных растворов), помещенных в кювету, выполняющую роль нарушения в микрополосковом фотонном кристалле.

Экспериментально исследовался ряд водноэтанольных растворов с содержанием этанола 0 % (дистиллированная вода), 19 %, 38 %, 57.5 %, 77 % и 96 %. Измерения частотных зависимостей коэффициента пропускания проводились с помощью векторного анализатора цепей *Agilent PNA-L Network Analyzer N5230A* в диапазоне температур $23 - 60^\circ\text{C}$ (рис. 8 и рис. 9).

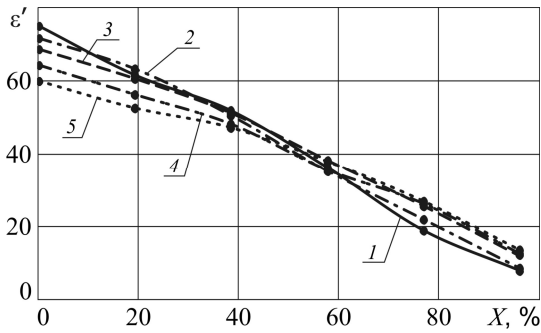


Рис. 8 Зависимость действительной части комплексной диэлектрической проницаемости от объемной доли этанола в растворе для различных температур: 1–23°C, 2–30°C, 3–40°C, 4–50°C, 5–60°C.

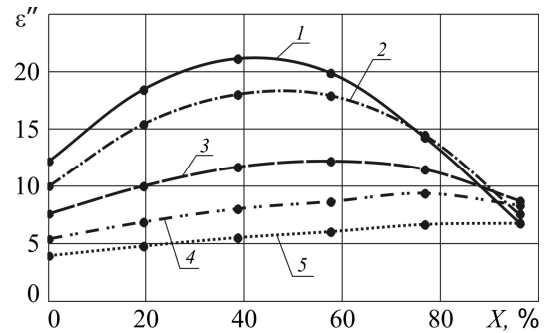


Рис. 9 Зависимость мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости от объемной доли этанола в растворе для различных температур: 1–23°C, 2–30°C, 3–40°C, 4–50°C, 5–60°C.

Как следует из результатов измерений, при всех температурах с ростом объемной доли этанола в растворе наблюдается монотонное уменьшение действительной части комплексной диэлектрической проницаемости раствора и немонотонное изменение мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости раствора, обладающее четко выраженным максимумом. При увеличении температуры происходит уменьшение действительной части комплексной диэлектрической проницаемости растворов с низким содержанием этанола и увеличение действительной части комплексной диэлектрической проницаемости растворов с высоким содержанием этанола. С ростом температуры максимум кривой, соответствующей мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости сдвигается в сторону растворов с высокой концентрацией этанола.

В заключении приведены основные результаты и сформулированы выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Таким образом, в ходе выполнения диссертационной работы:

- 1 Представлена теоретическая модель, описывающая взаимодействие электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами, содержащими нарушения периодичности в виде диэлектрических, полупроводниковых и металлических включений, и позволяющая рассчитывать коэффициенты отражения и прохождения СВЧ-излучения для такого рода структур.
- 2 Проведено компьютерное моделирование спектров отражения и прохождения одномерных волноводных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона при наличии в них нарушений периодичности в виде измененной длины центрального слоя, а также дополнительно введенного слоя диэлектрического или полупроводникового материала внутрь нарушенного слоя или помещения двухслойных структур в виде тонких нанометровых металлических пленок, нанесенных на диэлектрические подложки, после фотонного кристалла.
- 3 Установлено, что создание нарушения периодичности в одномерных волноводных фотонных кристаллах в виде изменения толщины центрального слоя и введения в периодическую структуру слоев диэлектрических, полупроводниковых и металлических слоев приводит к появлению узкого «окна прозрачности» в «запрещенной зоне» волноводного фотонного кристалла. При этом частотное положение и форма «окна прозрачности» определяются длинами и электрофизическими параметрами

слоев, формирующих нарушение периодичности, и позицией исследуемых слоев внутри слоя, нарушающего периодичность.

- 4 Установлено, что чувствительность коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с одномерным волноводным фотонным кристаллом, к изменению толщины и электропроводности полупроводниковой структуры, введенной в центральный нарушенный слой, зависит от её позиции внутри нарушенного слоя. Чувствительность достигает максимального значения в случае, когда полупроводниковая структура расположена на границе слоя, нарушающего периодичность, а минимального значения – при расположении полупроводниковой структуры в центре нарушенного слоя.
- 5 Исследованы спектры отражения и прохождения одномерных волноводных фотонных кристаллов, в которых нарушение периодичности реализовано посредством изменения длины центрального слоя и введения внутрь нарушенного слоя диэлектрической или полупроводниковой пластины или двухслойной структуры в виде тонкого полупроводникового слоя на высокоомной полупроводниковой подложке. Показано, что частотная зависимость коэффициентов отражения и прохождения в области «окна прозрачности» фотонного кристалла, содержащего такого рода неоднородности, определяется толщиной и электропроводностью полупроводникового слоя, комплексной диэлектрической проницаемостью, позицией введенного слоя внутри нарушенного слоя фотонного кристалла, а также длиной нарушенного слоя.
- 6 Исследованы зависимости коэффициента отражения и прохождения фотонного кристалла, содержащего нарушение периодичности в виде измененной длины центрального слоя и расположенной после фотонного кристалла двухслойной структуры, представляющую собой нанометровую металлическую пленку на диэлектрической подложке. Показано, что частотная зависимость коэффициентов отражения и прохождения в области «окна прозрачности» фотонного кристалла, содержащего такого рода неоднородности, определяется толщиной и электропроводностью металлической пленки и длиной нарушенного слоя фотонного кристалла.
- 7 Представлено теоретическое обоснование возможности расширения диапазона измеряемых по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона толщин и электропроводностей полупроводниковых слоев в случае, когда они играют роль нарушения периодичности одномерных волноводных фотонных кристаллов. Установлено, что возможно определение параметров полупроводникового слоя в диапазоне толщин от 100 нм до 500 мкм и электропроводностей от $1,0 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ до $1000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.
- 8 Представлено теоретическое обоснование методов измерения параметров диэлектрических, полупроводниковых и металлических слоев в широком диапазоне изменения этих параметров по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с использованием одномерных волноводных фотонных кристаллов, при изменении позиции исследуемого слоя внутри нарушенного слоя фотонного кристалла и при изменении длины нарушенного слоя.
- 9 Показана возможность решения обратной задачи по определению толщины и электропроводности полупроводниковых пластин и нанометровых слоев, диэлектрической проницаемости и электропроводности слоев диэлектрических и полупроводниковых материалов, играющих роль неоднородности в волноводном фотонном кристалле, электропроводности нанометровых металлических пленок, нанесенных на диэлектрические подложки, и расположенных после фотонного кристалла с нарушенной длиной центрального слоя.
- 10 Представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия СВЧ-излучения с одномерными волноводными фотонными кристаллами в частотном диа-

пазоне 8–12 ГГц. Экспериментально исследованы спектры отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с одномерными волноводными фотонными кристаллами, содержащими нарушения периодичности в виде измененной длины центрального слоя и введенного диэлектрического или полупроводникового слоя внутрь нарушенного слоя, а также с одномерными волноводными фотонными кристаллами, размещенными перед двухслойными структурами в виде нанометровой металлической плёнки, нанесенной на диэлектрическую подложку.

- 11 Экспериментально реализованы методы определения толщины и электропроводности полупроводниковых пластин и структур с нанометровыми слоями, диэлектрической проницаемости и электропроводности диэлектрических и полупроводниковых материалов, электропроводности нанометровых металлических пленок, нанесённых на диэлектрические подложки, с использованием спектров отражения и прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с одномерными волноводными фотонными кристаллами, при изменении длины центрального нарушенного слоя.
- 12 Проведены измерения толщины и электропроводности, комплексной диэлектрической проницаемости кремниевой пластины, электропроводностей ряда нанометровых пленок тантала. Дополнительно проведены измерения комплексной диэлектрической проницаемости ряда водноэтанольных растворов при изменении температуры в диапазоне 23–60°C.
- 13 На основании полученных результатов подана заявка на патент на изобретение: «Способ определения электропроводности и толщины полупроводниковых пластин или нанометровых полупроводниковых слоев в структурах «полупроводниковый слой–полупроводниковая подложка».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Постельга А.Э., Пономарев Д.В. Определение параметров тонких полупроводниковых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов// Доклады Академии Наук. 2012. Т. 443, № 5. С. 564–566.
2. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей // Журнал технической физики. 2010. Т. 80, вып. 8, С. 143–148.
3. Усанов Д.А., Никитов С.А. Скрипаль А.В., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Измерение параметров твердых и жидких диэлектриков на сверхвысоких частотах с использованием микрополосковых фотонных структур// Радиотехника и электроника. 2012. Том. 57, № 2. С. 230–236.
4. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Романов А.В., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Фотонные структуры в СВЧ-диапазоне и их применение для измерения параметров композитов с включениями из углеродных нанотрубок и жидких диэлектриков// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13, № 3. С. 26–34.

В других изданиях

5. Ponomarev D.V., Nikitov S.A., Usanov D.A., Skripal A.V., Postelga A.E. Determination of Parameters of Thin Semiconductor Layers by means of One-dimensional Microwave Photonic Crystals// Proc. of 19th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON-2012. Warsaw, Poland. May 21-23, 2012. Vol. 2. pp. 789–793.
6. Usanov D.A., Nikitov, S.A., Skripal A.V., Postelga A.E., Ponomarev D.V. Application of One-dimensional Microwave Photonic Crystals for Measurements of Parameters of Structures

Based on Thin Semiconductor Layers// Abstract of International Conference “Days of Diffraction 2012”. Saint-Petersburg. May 28 – June 1, 2012. p. 179.

7. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Постельга А.Э., Пономарев Д.В. Измерение электропроводности и толщины полупроводниковых пластин с использованием фотонных структур СВЧ-диапазона// Материалы 22-ой Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо'2012). Севастополь, Украина. 10-14 сентября 2012 г. Т. 2. С. 667–668.
8. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Куликов М. Ю., Пономарев Д. В. Использование микрополосковых фотонных кристаллов для измерения электрофизических параметров водноэтанольных растворов// Материалы 20-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии КрыМиКо-2010» 13-17 сент.2010 г. Севастополь, Крым. Украина. С.1063–1064.
9. Пономарев Д.В., Куликов М.Ю. Сенсоры на основе СВЧ фотонных кристаллов// Всероссийская молодежная выставка-конкурс прикладных исследований, изобретений и инноваций. Сборник материалов, Саратов 27—28 октября 2009 г., Издательство Саратовского университета, 2009. С. 28.
10. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения жидкостей// Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: Труды VII Международной российско-казахстанско-японской научной конференции / Под. ред. проф. Л.В. Кожитова. М.: Издат-во МГИУ, 2009. 1205 с. С. 540—548.
11. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Куликов М. Ю., Пономарев Д. В. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения полярных жидкостей// Материалы 19-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии КрыМиКо—2009» 14—18 сент. 2009 г. Севастополь, Крым. Украина. С. 845—846.
12. Dmitry A. Usanov, Alexander V. Skripal, Anton V. Abramov, Anton S. Bogolubov, Maxim Y. Kulikov, Denis V. Ponomarev. Microstrip Photonic Crystals and Their Utilization for Measurement of Liquids// Proceedings of the 39th European Microwave Conference. 29 September — 1 October 2009, Rome, Italy, pp. 1049—1052.
13. D.A. Usanov, A.I.V. Skripal, A.V. Skripal, A.V. Abramov, A.S. Bogolubov, M.Y. Kulikov, D.V. Ponomarev Photonic Structures in the Microwave Band and Their Applications// Proc. of 18th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON-2010. Vilnius, Lithuania. June 14—16, 2010. Vol. 2. pp. 686—694.

Патенты

14. Пат. 2419099 Российская Федерация, МПК G01R 27/26. Устройство для измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь жидкости/ Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В.; заявитель и патентообладатель Сарат. гос. ун-т. Заявл. 14.01.2010; опублик. 20.05.2011. Бюл. 14. 11 с.: ил.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics// Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58, no. 20. pp. 2059—2062.
2. Гуляев Ю.В., Никитов С.А. Фотонные и магнитофотонные кристаллы – новая среда для передачи информации// Радиотехника. 2003. №8. С. 26–30.
3. Yablonovitch E. Photonic band-gap crystals// Journal of Physics-Condensed Matter, 1993. Vol.5, no.16. pp. 2443–2460.
4. Yablonovitch E., Gmitter T.J., Meade R.D. Donor and acceptor modes in photonic band structure// Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 67, no. 24. pp. 3380–3383.

5. Беляев Б.А., Ходенков С.А., Шабанов В.Ф. Исследование полосно-пропускающих фильтров на одномерных диэлектрических фотонных кристаллах// Известия высш. учеб. заведений. Физика. 2008. Т. 51. С. 150—153.
6. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Скворцов В.С., Мерданов М.К. СВЧ-фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов и создания функциональных устройств СВЧ-электроники// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2008. Т. 11, № 3. С. 51—59.
7. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Сысоев Н.Ю. Определение электропроводности и толщины полупроводниковых слоев по спектру отражения СВЧ-излучения// Известия высших учебных заведений. Электроника. 2011. № 90. С. 71—77.

Пономарев Денис Викторович

**ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ
С ФОТОННЫМИ КРИСТАЛЛАМИ, СОДЕРЖАЩИМИ
В КАЧЕСТВЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ,
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.
Усл. – печ. л. 1.0
Тираж 100 экз. Заказ № _____.
Типография Издательства Саратовского университета.
410012, Саратов, Астраханская, 83.