



На правах рукописи

Галка Александр Георгиевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА
БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ДИАГНОСТИКИ
ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕД**

01.04.03 – радиофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).

Научный руководитель: Костров Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН» (г. Нижний Новгород).

Официальные оппоненты: Кудрин Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;

Волокитин Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Защита состоится «28» октября 2019 года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д002.069.02 при ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН» по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН».

Автореферат разослан «15» июля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Э.Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации

Исследование электродинамических свойств однородных и неоднородных материальных сред является востребованной задачей практически во всех отраслях науки и техники. Актуальность развития методов изучения электрофизических характеристик обусловлена возможностью получения на основе их значений информации о свойствах и внутренней структуре исследуемых объектов. Данные измерения получили наибольшее развитие в таких областях как физика плазмы, геофизика, медицина [1-3].

Знание комплексной диэлектрической проницаемости позволяет выявить некоторые закономерности строения молекул вещества, недоступные другим методам, определить их дипольный момент и времена релаксации, что актуально при изучении свойств жидких кристаллов, полярных жидкостей и растворов [4].

Измерение электродинамических характеристик биологических тканей актуально в различных медицинских приложениях. Это обусловлено тем, что патологические и физиологические процессы в биологических тканях, как правило, сопровождаются изменением их диэлектрической проницаемости и проводимости [5]. Данное обстоятельство дает возможность реализовать диагностику различных заболеваний, в том числе и на ранних стадиях. Глубинный профиль электрических свойств биологических сред оказалась информативен для медицины, поскольку эти свойства тесно связаны с состояниями биоткани. В последнее время активно развивается метод электроимпедансной [5,6] и магнитоиндукционной [7, 8] томографии, позволяющий визуализировать на сравнительно низкой частоте пространственное распределение электропроводности внутренних органов. Данные методы используют большое количество измерительных электродов, контактирующих с телом пациента. Помимо диэлектрических измерений в медицинской практике применяют различные методы визуализации внутренней структуры объектов, дающие возможность отобразить различные их свойства: ЯМР-томография – плотность протонов, рентгеновская томография – плотность вещества, акустическая томография – механические свойства среды. Каждый метод имеет ограниченную область применения.

Неразрушающие методы измерения электродинамических характеристик востребованы во многих геофизических приложениях, связанных с подповерхностным зондированием земли с целью поиска полезных ископаемых, определения глубины водоносных слоев, обнаружения неметаллических предметов и скрытых полостей, не лоцируемых металлоискателем [9]. Для решения данных задач используются метод вертикального электрического зондирования и геолокация. Методом вертикального электрического зондирования [10] изучается геоэлектрический разрез по кривым за-

висимости кажущегося сопротивления от расстояния между питающими и приемными электродами измерительной установки. Этот метод основан на геометрическом принципе электромагнитного зондирования – глубина проникновения поля постоянного или переменного низкочастотного тока регулируется расстоянием от источника поля до приемника. В последнее время активно развивается радиолокация слоистых сред – материковых покровов, льдов с целью получения информации об электромагнитных свойствах и строении участков земных покровов [11].

При изучении поверхности диэлектрических и полупроводниковых структур, выявлении мелких дефектов при создании твердотельной микроэлектроники успешно используется ближнеполевая СВЧ-микроскопия [12], обладающая сверхвысокой разрешающей способностью при построении поверхностного изображения.

Измерения диэлектрической проницаемости плазмы в лабораторных плазменных установках используются для диагностики концентрации плазмы и ее флуктуаций. В качестве измерительной системы применяется СВЧ-зонд на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии [1].

Среди многочисленных способов диагностики различных материальных сред наиболее востребованы те, которые позволяют получать информацию об объекте без непосредственного физического воздействия на него. К таким методам относится резонансная ближнеполевая СВЧ-диагностика.

В рамках резонансной ближнеполевой СВЧ-диагностики зондирование среды осуществляется квазистатическим электрическим полем, локализованным вблизи электрически малой антенны и имеющим дипольный характер распределения в пространстве. Располагая в области «ближнего» поля исследуемый объект, можно исследовать его электродинамические параметры по значению импеданса антенны. Высокая чувствительность метода даже к малым изменениям параметров исследуемого объекта достигается за счет применения резонатора в составе измерительной системы. Резонатор является, по сути, согласующим устройством между измерительной аппаратурой и ближнеполевой антенной. Частота зондирующего квазистатического поля антенны выбирается из условия, чтобы характерный масштаб его локализации был меньше глубины скин-слоя в исследуемой среде. В ближнеполевых резонансных измерительных системах основанными источниками диагностической информации являются смещение и уширение резонансной кривой. Основное достоинство резонансных датчиков – их миниатюрность и, как следствие, высокая чувствительность даже к малым изменениям параметров среды, в которую они помещены, а также простота в изготовлении, гибкие функциональные возможности и разнообразие конструкторских решений.

Ближнеполевая СВЧ-диагностика имеет преимущество по сравнению с методами оптического и инфракрасного диапазонов в высокой проникающей способности зондирующего излучения до нескольких сантиметров

внутри биологических объектов. В отличие от волновых методов, ближне-полюсная диагностика не ограничена дифракционным пределом. Ее пространственная разрешающая способность позволяет восстанавливать структуру исследуемого объекта с точностью, намного меньшую длину волны.

Восстановление внутренней структуры среды осуществляется путем сканирования над ее поверхностью системой датчиков с разной глубиной зондирования, определяемой размерами антенны. Увеличение апертуры антенны влечет увеличение области локализации ближнего поля в среде и является зондирующим фактором для резонансной ближнеполюсной СВЧ-томографии. Обратные задачи по восстановлению внутреннего профиля среды по данным измерений являются довольно трудоемкими и в общем случае математически некорректными. Для их решения необходима априорная информация об искомой структуре объекта. Первоочередными задачами для развития метода резонансного ближнеполюсного зондирования однородных и неоднородных сред являются теоретическое исследование измерительной системы и ее экспериментальная апробация в лабораторных и натуральных экспериментах.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является разработка физических и математических основ метода резонансной ближнеполюсной СВЧ-диагностики диэлектрических и проводящих сред и исследование возможностей практического применения полученных результатов для измерения параметров плазмы, давления газов, диагностики биологических тканей, а также развитие метода ближнеполюсной томографии на примере подповерхностной диагностики проводящих сред.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Применение амплитудно-фазового метода для диагностики концентрации плазмы с помощью резонансного СВЧ-зонда на отрезке двухпроводной линии позволяет существенно увеличить диапазон измеряемых значений концентрации плазмы, не увеличивая геометрических размеров датчика.
2. Использование развитого амплитудно-фазового метода позволяет проводить диагностику давления газа в широком диапазоне значений с помощью резонансного СВЧ-датчика на отрезке коаксиальной линии.
3. Метод резонансного ближнеполюсного СВЧ-зондирования можно эффективно использовать в медицинских приложениях: для неинвазивной диагностики меланомы, для диагностики глубинной структуры кожи и изменений в них, возникающих в условиях ожога.
4. Подповерхностную структуру комплексной диэлектрической проницаемости среды можно восстановить путем глубинного сканирования

системой резонансных датчиков с разным масштабом локализации зондирующего электрического поля.

5. Амплитудно-фазовый метод, позволяющий существенно уменьшить минимально измеряемое значение концентрации плазмы без увеличения габаритов резонансного СВЧ-зонда, может быть использован для диагностики параметров ионосферной плазмы на борту микроспутника.

Научная новизна:

1. Впервые развит и реализован амплитудно-фазовый метод для измерения концентрации плазмы резонансным СВЧ-зондом. Показано, что разработанный метод расширяет диагностические возможности датчика, увеличивая диапазон измеряемых значений на три порядка вниз по концентрации.

2. Разработан и апробирован резонансный датчик давления газа на полуволновом отрезке коаксиальной линии. Продемонстрировано, что регистрация резонансной частоты датчика посредством амплитудно-фазового метода позволяет измерять давление газа в вакуумных системах в широком диапазоне значений и исследовать динамику газа во времени при инъекции молекулярных пучков.

3. Разработан и реализован метод ближнепольного СВЧ-зондирования для неинвазивной подповерхностной диагностики в медицине. Впервые показаны различия диэлектрических свойств здоровой кожи, невуса и меланомы. Обнаружены изменения глубинной структуры кожи в области термической травмы по сравнению с тканями здоровой кожи.

4. Впервые в мире предложен новый метод диагностики параметров ионосферной плазмы на борту микроспутника с помощью резонатора на отрезке двухпроводной линии.

5. Предложен и экспериментально реализован метод резонансной ближнепольной СВЧ-томографии применительно к малоглубинному зондированию земли. Показано, что глубинное сканирование земли можно проводить с помощью системы ближнепольных антенн в виде двух параллельных проводов с разными расстояниями между ними.

Практическая значимость диссертационной работы

Описываемые в диссертации методы и приборы имеют непосредственную практическую значимость. Предложенные конструкции резонансных ближнепольных датчиков для измерения концентрации плазмы, давления газа, биологических тканей, почвы и других материальных сред существенно расширяют арсенал основных методов исследования объектов и способствуют развитию диэлектрических измерений в дециметровом диапазоне длин волн. Наиболее значимые приложения для описанных диагностик следующие.

Малогобаритные датчики концентрации плазмы могут быть применены для контроля и автоматизации технологического процесса на промышленных установках с вакуумным плазменным напылением. Развитый в диссертации амплитудно-фазовый метод уже нашел практическое применение и впервые будет использован для измерения концентрации ионосферной плазмы и ее возмущений на борту микроспутника «Трабонт» с высотой орбиты 500 км. Локальность метода позволит исследовать мелкомасштабные пространственные неоднородности плотности плазмы, а широкий частотный диапазон датчика, определяемый добротностью резонатора, позволит фиксировать малые флуктуации концентрации плазмы, связанные с волновыми процессами в ионосфере. Разработанные компактные манометрические датчики давления с широким диапазоном измеряемых значений и высоким временным разрешением могут применяться для динамического контроля давления газа на вакуумных установках. Развитая методика подповерхностного зондирования проводящих сред может быть использована в различных практических приложениях, например, в археологии, дефектоскопии. Разработанные медицинские датчики представляют собой прототип автоматизированного ближнепольного комплекса для восстановления глубинного профиля электродинамических параметров, являющихся информативным показателем структурных изменений биологических сред. Датчики для диагностики меланомы могут использоваться для неинвазивного экспресс-анализа характера кожных новообразований. Так же они могут быть применены в комбустииологии с целью мониторинга состояния ожоговой раны. Важно подчеркнуть, что СВЧ-зондирование может быть реализовано без снятия раневых покрытий.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на 13-14 конференциях «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, 2018-2019), 15 конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск, 2017), 3 Международной конференции «Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications» (Нижний Новгород, 2018), 22-25 Международных крымских конференциях «Microwave & Telecommunication Technology» (Севастополь, 2012-2015), 46 Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2019), Международной научно-практической конференции «Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования в физиологии, фармакологии и медицине» (Санкт-Петербург, 2011, 2016), Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 2017), 9 конференции «Современные методы диагностики плазмы и их применение» (Москва, 2014), Всероссийской микроволновой конференции (Москва, 2014), 9 Международной конференции «Antenna Theory and Techniques»

ISATT-2013, Научно-практической конференции, посвященной 145-летию Военно-морского клинического госпиталя Тихоокеанского морского флота (Владивосток, 2017), Международной конференции «Термические поражения и их последствия» (Москва, 2017), 3 Конгрессе «Медицина чрезвычайных ситуаций. Современные технологии в травматологии и ортопедии» (Москва, 2018), Международной научной конференции «Системный анализ в медицине» (Благовещенск, 2018).

Представленные результаты вошли в число основных результатов научной работы Института прикладной физики РАН в 2015 году, а также отмечены премиями Конкурсов работ молодых ученых ИПФ РАН в 2015 и 2019 г. и на конференции молодых ученых "Взаимодействие полей и излучения с веществом" в Институте солнечно-земной физики СО РАН (г. Иркутск) в 2017 г.

Публикации

Всего по теме диссертации автором опубликовано 20 статей (из них 15 – в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных материалов) в российских и зарубежных рецензируемых научных журналах, входящих в российские и международные системы цитирования РИНЦ, Web of Science, Scopus, 14 публикаций в сборниках трудов российских и международных конференций, получен 1 патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора в проведенные исследования

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, выполнены при непосредственном активном участии автора либо получены им лично. Автор руководил работами, результаты которых представлены в диссертации, ему принадлежит решающая роль в планировании и проведении экспериментов, выборе экспериментальных методик, интерпретации экспериментальных данных, разработке теоретических моделей. Основная часть результатов доложена автором на семинарах, конкурсах работ молодых ученых в Институте прикладной физике РАН и научных конференциях. Все без исключения диагностические системы, на которых проводилась экспериментальная апробация полученных результатов, изготовлены автором лично.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, приложения, заключения и списка цитируемой литературы. Список литературы включает 142 наименования. Общий объем диссертации составляет 154 страницы, включая 57 рисунков и 4 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность выбранного направления исследований, кратко изложено содержание диссертации.

В **главе 1** развита электродинамическая модель резонансной измерительной системы для ближнепольного зондирования материальных сред. Основными элементами измерительной системы являются резонатор с включенной в него в качестве нагрузки ближнепольной зондирующей антенной (рис. 1). Связь резонатора с линиями возбуждения и приема сигнала осуществляется магнитными петлями связи у закороченного конца резонатора. Для расчета отклика резонатора на вносимое средой возмущение применен «импедансный» подход, в рамках которого вся измерительная система сводится к эквивалентному ей колебательному контуру с сосредоточенными параметрами. Методом пересчета импедансов по длинной линии и через магнитную связь получены общие выражения для токов в приемной и возбуждающей петлях связи и в закороченном конце резонатора, позволяющие связать резонансной отклик зонда с исследуемыми параметрами среды. Ценность получившихся выражений заключается в их универсальном характере при построении электродинамической модели распределенного колебательного контура на отрезке длинной линии. Основным преимуществом этих формул является возможность моделировать изменения электродинамических свойств исследуемых объектов в широком диапазоне значений диэлектрической проницаемости и проводимости.

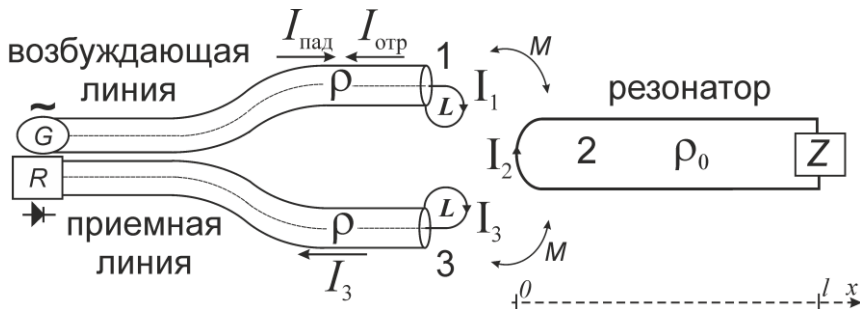


Рис. 1. Электродинамическая модель измерительной системы. 1 – возбуждающая петля, 2 – резонатор, 3 – приемная петля, G – генератор, R – активное сопротивление детектирующего устройства, ρ , ρ_0 – волновые сопротивления коаксиального кабеля и резонатора, соответственно, M – коэффициент взаимной индукции петель связи с резонатором, Z – комплексный импеданс измерительной части резонатора, l – длина резонатора, I_1 , I_2 , I_3 – токи в возбуждающей петле, закороченном конце резонатора и приемной петле, соответственно.

Для конкретных конструкций измерительных систем, используемых в 2–4 главах диссертации, в условиях малого возмущения, вносимого средой

в резонатор, получены аналитические выражения, позволяющие связать диэлектрическую проницаемость и проводимость среды с резонансной частотой системы и амплитудой сигнала при резонансе. Конкретно, в **разделе 1.1.1** рассмотрены измерительные системы в виде резонатора на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии для измерения концентрации плазмы и резонатор на полуволновом отрезке коаксиальной линии для диагностики давления газа. В этом случае зондирование среды осуществляется квазистатическим электрическим полем резонатора. В **разделе 1.1.2** применительно к подповерхностной диагностики неоднородных сред рассмотрен резонатор, ближнепольная антенна которого выполнена на отрезке двухпроводной линии. Такой тип измерительной системы наиболее удобен для реализации глубинного сканирования. Для диагностики проводящих сред, например, биологических тканей, используется резонатор с «неполным» подключением ближнепольной антенны (**разделе 1.1.3**). Данный вид подключения реализуется путем параллельного соединения измерительной емкости и шунтирующей индуктивности. В **разделе 1.2** для демонстрации правильности развитой электродинамической модели представлен альтернативный подход к расчету измерительной системы. Предлагаемый в этом разделе метод основан на решении системы телеграфных уравнений для тока и напряжения в резонаторе с помощью теории возмущения. Результаты обоих подходов совпадают.

Материалы, изложенные в первой главе диссертации, опубликованы в работах [12А, 14А].

Глава 2 посвящена развитию амплитудно-фазовой методики определения малых вариаций диэлектрической проницаемости однородных сред на примере резонансных систем для диагностики концентрации плазмы (СВЧ-зонд) и давления газа (коаксиальный полуволновый резонатор). В рамках данной методики измерения проводятся на фиксированной частоте, соответствующей резонансной частоте датчика в вакууме, а малые изменения резонансной частоты системы в пределах ширины собственного резонанса регистрируются посредством амплитудно-фазовых измерений. В работе проведено теоретическое исследование диагностик и получены выражения для амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик измерительных систем, установлена связь между выходным сигналом датчиков и параметрами среды.

Применительно к диагностике концентрации слабомагнитной плазмы (**раздел 2.1**) развитая методика применима в случае, когда добротность резонатора СВЧ-зонда на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии не зависит от наличия плазмы. В **разделе 2.1.1** рассчитана общая добротность измерительной системы, складывающаяся из всех видов потерь энергии в резонаторе: омические потери в проводниках, образующих резонатор, столкновительные потери в плазме, потери на излучение, а также потери на связь резонатора с линиями возбуждения и приема сигнала. По-

казано, что последний вид потерь вносит определяющий вклад в общую добротность резонатора. Здесь же представлена схема амплитудно-фазовых измерений, суть которой состоит в измерении набега фазы сигнала, прошедшего через резонатор с плазмой. Сигнал от источника СВЧ-колебаний делится на два равных, один из которых проходит через резонатор с плазмой и поступает на вход фазового детектора, где смешивается с опорным. В **разделе 2.1.2** получена аналитическая связь между выходным сигналом в приемной аппаратуре и концентрацией плазмы. **Раздел 2.1.3** посвящен экспериментальной апробации методики на примере малогабаритного СВЧ-зонда на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии с собственной резонансной частотой $f_0 = 2034$ МГц и добротностью порядка 150. В качестве независимого метода использовался классический способ измерения концентрации по сдвигу максимума резонансной кривой низкочастотным зондом больших размеров с $f_0 = 420$ МГц. Продemonстрировано, что предложенная методика увеличивает динамический диапазон СВЧ-зонда вниз по концентрации на три порядка. Концентрация плазмы в диапазоне $7 \cdot 10^8 - 7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ измерена СВЧ-зондом с $f_0 = 2034$ МГц стандартной методикой по сдвигу максимума резонансной кривой (рис. 2, а). Диапазон регистрируемых концентраций с помощью амплитудно-фазовой методики составил от $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ до $7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$. Полученные результаты при использовании развитой методики совпали с точностью не хуже 5% с результатами, полученными с помощью низкочастотного СВЧ-зонда.

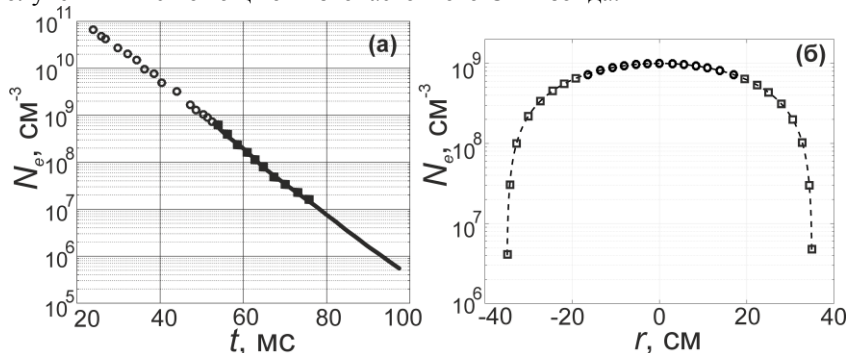


Рис. 2. (а) Временная зависимость концентрации плазмы после окончания работы плазмосоздающего источника: сплошная кривая – измерения выполнены малогабаритным СВЧ-зондом ($f_0 = 2034$ МГц) с применением амплитудно-фазовой методики, $\circ$ – измерения выполнены тем же использованием стандартной методики, $\square$ – измерения выполнены низкочастотным СВЧ-зондом ($f_0 = 420$ МГц) с использованием стандартной методики. (б) Радиальное распределение концентрации плазмы на стенде «Ионосфера» в момент времени $t = 50$ мс после пробоя плазмы. Измерения проводились малогабаритным СВЧ-зондом ($f_0 = 2034$ МГц): $\circ$ – измерения выполнены с использованием стандартной методики, $\square$ – измерения выполнены при помощи амплитудно-фазового метода.

Амплитудно-фазовый метод совместно с традиционным способом измерения концентрации плазмы существенно расширяет диагностические возможности СВЧ-зонда. Для демонстрации этого проведены измерения радиального распределения концентрации плазмы на стенде «Ионосфера» на 50 мс после выключения плазмозооадающего генератора (рис. 2, б). Стандартная методика на таких временах позволяет проводить измерения концентрации плазмы на расстояниях не более 15 см от оси камеры, в то время как амплитудно-фазовый метод расширяет пространственный диапазон измерений более чем в два раза.

Применительно к диагностике давления газа (раздел 2.2) разработан и изготовлен резонансный СВЧ-датчик с собственной частотой 1031.6 МГц и добротностью 450 на полуволновом отрезке коаксиальной линии с продольными прорезями для заполнения газом объема резонатора (раздел 2.2.1). Смещение резонансной частоты измерительной системы относительно «вакуумного» значения определяется диэлектрической проницаемостью газа и, следовательно, концентрацией его молекул. При известной температуре газовой среды по результатам измерений однозначно определяется ее давление. При температуре 22°C получены калибровочные кривые для аргона, гелия и воздуха, связывающие амплитуду выходного сигнала СВЧ-датчика с давлением исследуемых газов (рис. 3, а). В разделе 2.2.2 экспериментально установлено, что минимальное давление, регистрируемое датчиком, а также его чувствительность составляет 0.6 Торр для гелия и 0.1 Торр для аргона и воздуха. Верхняя граница давления, до которой проводилось тестирование датчика, равнялось 2 атм. При этом давлении были рассчитаны диэлектрические проницаемости исследуемых газов. Получено, что отклонение измеренных величин от табличных данных составляет 5-10%.

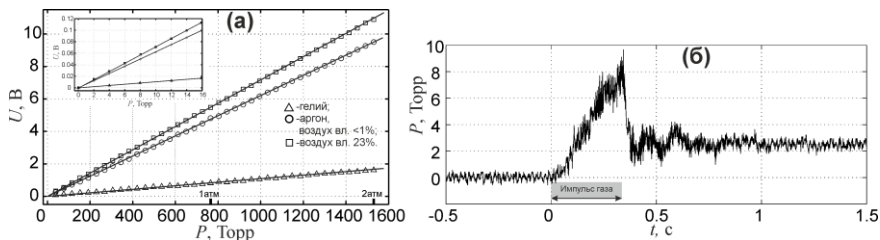


Рис. 3. (а) Зависимость амплитуды сигнала с диагностической системы от давления рабочего газа для воздуха влажностью 23% ($\square$), аргона и сухого воздуха ($\circ$) и гелия (Δ) при температуре 22°C. (б) Осциллограмма давления в вакуумной камере при импульсном напуске газа. Длительность напуска 0.33 с, начальное давление в камере – $2 \cdot 10^{-1}$ Торр, конечное – 2.5 Торр, рабочий газ – воздух.

Высокое временное разрешение датчика давления на уровне 10^{-7} с, определяемое добротностью резонатора, позволяет осуществлять диагностику

нестационарных газовых процессов. Для демонстрации возможностей разработанного датчика измерена временная динамика импульсного напуска газа в вакуумную камеру (рис. 3 б).

Материалы, изложенные во второй главе диссертации, опубликованы в работах [1А, 8А, 11А, 25А].

Глава 3 посвящена разработке и апробации в условиях клиники измерительных систем для неинвазивной диагностики биологических тканей на основе метода резонансного ближнеполюсного зондирования. Рассмотрены особенности конструкции изготовленных датчиков на основе высокодобротных резонаторов и описана методика подповерхностного зондирования (**раздел 3.1**). В качестве ближнеполюшной антенны (измерительной емкости) выбрана краевая емкость цилиндрического конденсатора, внешняя обкладка которого оканчивается металлическим фланцем. Именно такая антенна позволяет реализовать необходимые глубины зондирования кожи и подкожных структур от 1 до 5 мм. В **разделе 3.2** рассмотрен эффект «прижима», характеризующийся зависимостью показаний ближнеполюсного измерительного датчика от силы его давления на поверхность биообъекта. Предложены конструктивные решения, позволяющие свести к минимуму негативное влияние «прижима», в виде контроля силы прижатия датчика к биологической ткани с помощью динамометрического устройства, встроенного в измерительный аппликатор. Далее представлены результаты экспериментального исследования возможностей метода ближнеполюсного СВЧ-зондирования для диагностики различных заболеваний с помощью системы датчиков с разными глубинами зондирования (**раздел 3.3**). Тестирование резонансных датчиков проводилась на примере задачи по обнаружению контрастных локализованных образований (неоднородностей) в однородной проводящей среде. В качестве неоднородности использовался прямоугольный параллелепипед размером 8x8x10 мм из тефлона, погруженный в спирт на глубину 0.5 мм (контрастность диэлектрической проницаемости неоднородности составляла 12:1). Экспериментально измеренные максимальные глубины зондирования датчиков составляли 1.4, 2.4 и 3.4 мм. Путем двумерного сканирования области, содержащей тефлоновый параллелепипед, каждым датчиком получены изображения неоднородности в виде контрастного образования на фоне однородной среды, причем контраст образования увеличивался с увеличением глубины зондирования датчика. Продемонстрирована диагностическая и прогностическая ценность резонансного ближнеполюсного СВЧ-зондирования для неинвазивной диагностики меланомы кожи (**раздел 3.3.1**) и для диагностики термической травмы (**раздел 3.3.2**). Применительно к диагностике меланомы кожи проводилась отработка метода резонансного ближнеполюсного СВЧ-зондирования на удаленных в ходе оперативного вмешательства тканях кожи, содержащих доброкачественные и злокачественные новообразования (родинка – пигментный невус, кератома, меланома). Интегральная диэлек-

трическая проницаемость тканей невуса и здоровой кожи практически не имеют отличий на глубине зондирования 1.1 мм. Напротив, диэлектрическая проницаемость тканей меланомы примерно в 2 раза меньше, чем у здоровой кожи, а в случае кератома – примерно в 1.3 раза меньше (рис. 4). Это свидетельствует о дифференциально-диагностической ценности метода при данных состояниях. Также показана информативность проведения резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования тканей в неинвазивном мониторинге их структуры при термической травме. Продemonстрировано, что влияние ожога проявляется в уменьшении значений мнимой части эффективной диэлектрической проницаемости в приповерхностном слое и возрастании - на глубинах 2–4 мм.

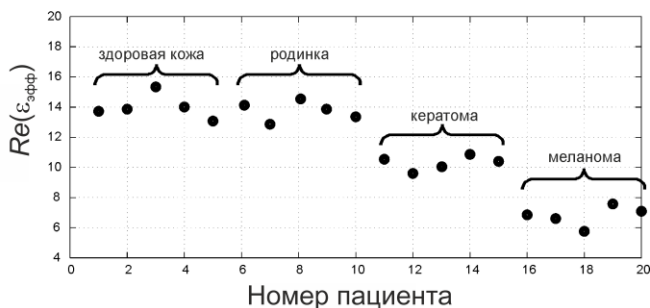


Рис. 4. Действительная часть эффективной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\text{эфф}}$ кожи для датчика с глубиной зондирования 1.1 мм кожи в области пигментных новообразований.

Материалы, изложенные в третьей главе диссертации, опубликованы в работах [2А-6А, 8А-10А, 13А, 16А-21А, 23А-24А, 26А-35А].

Глава 4 диссертации посвящена развитию метода резонансной ближнепольной СВЧ-томографии на примере задачи поиска водоносных слоев в грунте. В **разделе 4.1** раскрывается суть метода ближнепольной СВЧ-томографии, основанного на зондировании среды системой датчиков с разными глубинами зондирования. Описание конструкции резонансных датчиков, измерительная часть которых изготовлена из отрезков двухпроводной линии, приведено в **разделе 4.2**. Глубина зондирования каждого датчика определялась расстоянием между измерительными проводами. Аналитическая связь комплексной диэлектрической проницаемости среды с импедансом зондирующей антенны найдена в рамках модели плоскостной среды (**раздел 4.3**). В **разделе 4.4** приведено описание эксперимента и обоснование выбранной конструкции датчиков для подповерхностной диагностики водоносных слоев в грунте. Резонансные частоты измерительных систем составляли порядка 400 МГц, при этом толщина скин-слоя превосходила глубину зондирования датчиков. Апробация методики поиска водо-

носного слоя проводилась на локализованных проводящих неоднородностях с резкими границами в форме прямоугольных параллелепипедов (кюветы с жидкостью), расположенных в кварцевом песке различной влажности на глубине от 1 до 20 мм. В **разделе 4.5** представлены экспериментальные результаты. Здесь проведено экспериментальное измерение глубины зондирования датчиков в зависимости от расстояния между измерительными проводами и влажности песка (**раздел 4.5.1**). Результаты измерений сопоставлены с численным расчетом на основе развитой модели плоскостной среды. В **разделе 4.5.2** экспериментально продемонстрирован способ определения поперечных границ неоднородности в песке. Для этого датчик с глубиной зондирования 20 мм перемещался вдоль поверхности раздела сред в направлении перпендикулярном измерительным проводам (рис. 5, а). Кювета с водой была расположена на фиксированной глубине $h = 3$ мм от верхней границы песка. При сканировании датчиком вдоль границы регистрировался сдвиг резонансной частоты в зависимости от положения центра датчика. При прохождении датчиком области над областью неоднородности наблюдалась «ямка» – уменьшение резонансной частоты. Данная зависимость частоты f от положения датчика x позволяет определить поперечный размер L полости с жидкостью как разность между характерной областью изменения частоты S на графике $f(x)$ и расстоянием между проводами D : $L = S - D$. В **разделе 4.5.3** экспериментально реализован алгоритм нахождения глубины h залегания водного объема в песке различной влажности. Для этого датчики с глубиной зондирования h_{zond} большей h устанавливались над плоской частью неоднородности, и фиксировались частота и амплитуда резонанса в зависимости от расстояния между измерительными проводами D для датчиков с $D = 5, 9, 10.5, 12.5, 16, 20$ мм (рис. 5 б). По сдвигу резонансной частоты и амплитуде сигнала при резонансе находилась эффективная (интегральная на глубине зондирования) комплексная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{эфф}$ для каждого датчика. Параметр h находился путем минимизации целевой функции F с помощью модифицированного симплекс-метода, реализованного в качестве готового алгоритма в среде программирования Matlab R2015a. Целевая функция F представлялась в виде среднеквадратичного отклонения между экспериментальными значениями $\epsilon_{эфф}^{эксп}$ и теоретически рассчитанными $\epsilon_{эфф}^{теор}(h, D)$:

$$F = \sum_{i=1}^n (\epsilon_{эфф}^{эксп}(D_i) - \epsilon_{эфф}^{теор}(h, D))^2 / n.$$

Отклонение между экспериментальными результатами и реальными параметрами глубины залегания не превышает 20%.

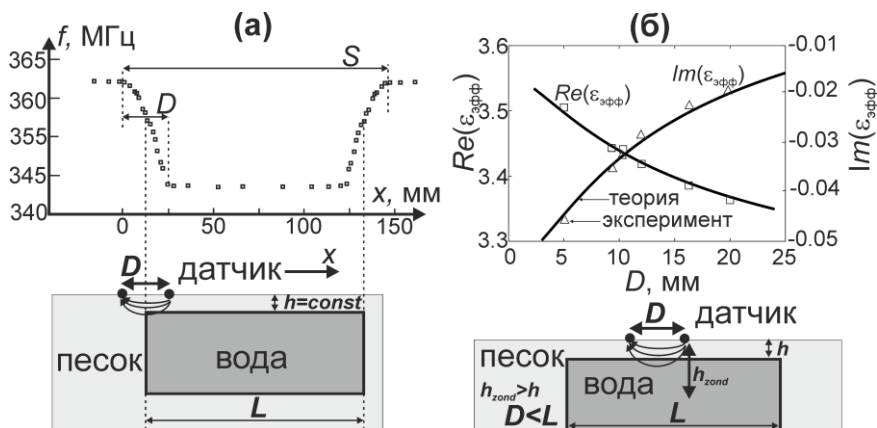


Рис. 5. (а) Зависимость резонансной частоты от горизонтальной координаты датчика, перемещаемого вдоль плоской границы неоднородности (кюветы с водой), расположенной на фиксированной глубине h в песке. (б) Измеренные значения действительной ($\square$) и мнимой (Δ) части эффективной диэлектрической проницаемости неоднородной по глубине среды при расположении датчика над плоской частью неоднородности. Сплошная кривая – теоретический расчет для восстановленной глубины h .

В разделе 4.5.4 реализуется алгоритм восстановления геометрических и электродинамических параметров неоднородной среды в виде песчано-водной смеси в форме прямоугольного параллелепипеда во влажном песке. Результаты эксперимента сопоставляются с истинными параметрами неоднородности.

Материалы, изложенные в четвертой главе диссертации, опубликованы в работе [15А].

В приложении диссертации развитая амплитудно-фазовая методика измерений концентрации плазмы с помощью СВЧ-зонда впервые была предложена для разработки датчика параметров ионосферной плазмы на борту микроспутника «Трабанти». На высотах 500 км, там, где будет летать спутник, концентрация плазмы варьируется в пределах 10^3 - 10^6 см $^{-3}$. При использовании стандартного метода определения плотности плазмы по сдвигу резонанса пришлось бы изготовить зонд с размерами порядка 10 м. Это не удовлетворяет массогабаритным требованиям на микроспутниках. Поэтому, было решено изготовить СВЧ-зонд меньших размеров с собственной частотой резонатора 180 МГц и использовать развитую амплитудно-фазовую методику измерения малых значений концентрации плазмы. Был изготовлен макет измерительной системы и проведено ее лабораторное испытание на плазменном стенде «Ионосфера» (ИПФ РАН) в условиях, максимально приближенных к ионосферным, в масштабе 1 : 1. Продемонстри-

рована возможность уверенной регистрации концентрации плазмы в диапазоне 10^3 – 10^6 см⁻³.

Материалы, изложенные в приложении диссертации, опубликованы в работах [7А, 22А].

В **заключении** изложены основные результаты проведенных в ходе выполнения диссертационной работы исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Построена общая электродинамическая модель резонансной измерительной системы для ближнепольного СВЧ-зондирования материальных сред, основными элементами которой являются резонатор с распределенными параметрами, ближнепольная антенна, контактирующая с исследуемым объектом, и магнитные петли связи для возбуждения и приема сигнала с резонатора. Получены универсальные выражения для токов в приемной, возбуждающей петлях связи и в резонаторе. Найдена связь резонансного отклика датчика с электродинамическими параметрами исследуемой среды.

2. Развита и впервые реализована амплитудно-фазовая методика измерения концентрации плазмы с помощью резонансного СВЧ-зонда на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии. Показано, что использование развитой методики позволяет, не увеличивая геометрических размеров СВЧ-зонда, увеличить диапазон измеряемых значений на три порядка вниз по концентрации. Разработана теоретическая модель измерительной системы и проведена ее экспериментальная апробация на плазменном стенде «Ионосфера» при исследовании пространственно-временных распределений концентрации плазмы СВЧ-зондом.

3. Разработана и апробирована резонансная диагностическая система для измерения давления газа в вакуумных системах и его динамики во времени при инъекции молекулярных пучков. Работа системы основана на измерении диэлектрической проницаемости газа, величина которой зависит от концентрации и дипольного момента его молекул. Показано, что чувствительность диагностической системы порядка 0.6 Торр для гелия, 0.1 Торр для аргона и воздуха. Диапазон рабочих давлений от 10^{-1} Торр до 2 атм. Временной масштаб изменения давления, регистрируемый датчиком, порядка 10^{-7} с.

4. Показана диагностическая ценность метода резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования для неинвазивной диагностики в медицинских приложениях. Разработаны резонансные СВЧ-датчики для оценки электродинамических параметров глубинной структуры кожи. Применительно к диагностике пигментных новообразований кожи показаны существенные отличия интегральной диэлектрической проницаемости тканей в области здорового участка кожи, пигментного невуса и меланомы, что может быть использовано для экспресс-анализа новообразований на ранних стадиях

развития. Показана возможность оценки состояния биологических тканей в условиях термической травмы по значениям электродинамических характеристик глубинной структуры кожи в области ожога.

5. Разработан и экспериментально реализован метод резонансной ближнепольной СВЧ-томографии для подповерхностного зондирования неоднородных проводящих сред на примере модельной задачи по поиску водоносных слоев в грунте. Изготовлена система резонансных ближнепольных датчиков, измерительная часть которых выполнена на отрезке двухпроводной линии. Глубина зондирования датчика определяется расстоянием между измерительными проводами. Развита и экспериментально реализован алгоритм, позволяющий с хорошей степенью точности восстанавливать геометрические размеры и электродинамические параметры неоднородности в виде водного объема в песке различной влажности.

6. Впервые предложена новая измерительная система для диагностики параметров ионосферной плазмы на борту малогабаритных спутников с высотой орбиты порядка 500 км. Проведено лабораторное макетирование измерительной системы на плазменной установке «Ионосфера» в масштабе 1 : 1 и продемонстрировано, что датчик уверенно регистрирует значение концентрации плазмы в диапазоне 10^3 – 10^6 см⁻³. Вспомогательные блоки диагностической аппаратуры проработаны в виде готовых схемотехнических решений.

Список цитированной литературы

1. Stenzel R.L. Microwave resonator probe for localized density measurements in weakly magnetized plasma // Rev. Sci. Instrum. 1976. V. 47, № 5. P. 603-607.

2. Эпов М.И., Миронов В.Л., Бобров П.П., Савин И.В., Репин А.В.. Исследование диэлектрической проницаемости нефтесодержащих пород в диапазоне частот 0.05—16 ГГц // Геология и геофизика, 2009, т. 50, № 5, с. 613—618.

3. Sunaga T., Ikehira H., Furukawa S., Shinkai H., Kobayashi H., Matsumoto Y., Yoshitome E., Obata T., Tanada S., Murata H., Sasaki Y. Measurement of the electrical properties of human skin and the variation among subjects with certain skin conditions // Physics in Medicine and Biology. V. 47, № 1, 2002. p. 11-15.

4. Беляев Б.А., Дрокин Н.А., Шепов В.Н. Применение микрополосковых резонаторов для исследования диэлектрических свойств жидких кристаллов на СВЧ // ЖТФ.-1995.- Т. 65. -Вып. 2 - С. 189-197.

5. Lazebnik M., Popovic D., McCartney L., Watkins C.B., Lindstrom M.J., Harter J., Sewall S., Ogilvie T., Magliocco A., Breslin T.M., Temple W., Mew D., Booske J. H., Okoniewski M., Hagness S.C. A large-scale study of the ultrawideband microwave dielectric properties of normal, benign and malignant

breast tissues obtained from cancer surgeries // *Phys. Med. Biol.* 2007. V. 52. №20. P. 6093.

6. Cherepenin V., Karpov A., Korjenevsky A., Kornienko V., Mazaletskaya A., Mazourov D., Meister D. A 3D electrical impedance tomography system for breast cancer detection // *Physiol. Meas.* – 2001. – V.22(1) – P. 9-18

7. Корженевский А.В., Карпов А.Ю., Корниенко В.Н., Культиасов Ю.С., Черепенин В.А. Электроимпедансная томографическая система для трехмерной визуализации тканей молочной железы // *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника.* – 2003. – № 8. – С. 5-10.

8. Корженевский А.В., Черепенин В.А. Индукционная томография // *Радиотехника и электроника*, т.42, N 4, с. 506-512, 1997.

9. Черняк Г.Я., Мясковский О.М. Радиоволновые методы исследований в гидрологии и инженерной геологии. М., «Недра», 1973. 176 с.

10. Злобинский А.В., Квашнин К.А., Могилатов В.С. Электроразведка методом зондирования вертикальными токами применительно к рудной геофизике // *Геофизика*, 2010, № 6. С.53-57.

11. Иммореев И.Я. Сверхширокополосные радары. Особенности и возможности // *Радиотехника и электроника.* – 2009. – Т.54, N 1. – С. 5-31.

12. Anlage S.M., Talanov V.V., Schwartz A.R. Principles of Near-field Microwave Microscopy//*Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale.* N.Y.: Springer-Verlag, 2007. V. 1. P. 215–253.

Список публикаций автора по теме диссертации

1А. Galka A.G., Yanin D.V., Kostrov A.V., Priver S.E., Malyshev M.S. Wide-range measurements of plasma density using a hairpin resonance microwave probe //*Journal of Applied Physics.* 2019. 125, 124501. P. 1-6.

2А. Янин Д.В., Галка А.Г., Костров А.В. Резонансные измерительные системы для ближнепольной СВЧ-томографии биологических тканей // *Успехи прикладной физики.* 2019. Т. 7, №2. С. 201-222.

3А. Гайкович К.П., Галка А.Г., Мартусевич А.К., Смирнов А.И., Янин Д.В. Экспериментальное исследование ближнепольной резонансной СВЧ диагностики биологических сред // *Журнал радиоэлектроники.* 2018. №1. С. 1-11.

4А. Дурново Е.А., Марочкина М.С., Шашурина С.В., Глявина И.А., Галка А.Г., Янин Д.В. Экспериментальное обоснование влияния воздуха и ротовой жидкости на результаты исследования слизистой оболочки ротовой полости при помощи резонансной ближнепольной СВЧ томографии // *Электромагнитные волны и электронные системы.* 2018. Т. 8. С. 12-17.

5А. Мартусевич А.К., Краснова С.Ю., Галка А.Г., Перетягин П.В., Костров А.В. Ближнепольное резонансное СВЧ-зондирование как метод исследования глубинной структуры ожоговой раны в эксперименте // *Современные технологии в медицине.* 2018. Т. 10, №3. С. 109-113.

6А. Мартусевич А.К., Краснова С.Ю., Галка А.Г. Исследование диэлектрических свойств кожи человека и животных // Трансляционная медицина. 2018. Прил. 3. С. 572.

7А. Айдакина Н.А., Галка А.Г., Гундорин В.И., Гушин М.Е., Зудин И.Ю., Коробков С.В., Костров А.В., Лоскутов К.Н., Могилевский М.М., Привер С.Э., Стриковский А.В., Чугунин Д.В., Янин Д.В. Моделирование физических явлений в ионосфере и магнитосфере земли на крупномасштабном плазменном стенде «КРОТ»: некоторые результаты и перспективы // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. №3. С. 331-342.

8А. Янин Д.В., Галка А.Г., Костров А.В., Привер С.Э., Смирнов А.И. Резонансный датчик давления газа на отрезке коаксиальной линии // Прикладная физика. 2017. №1. С. 74-80.

9А. Богомолова Е.Б., Мартусевич А.К., Клеменова И.А., Янин Д.В., Галка А.Г. Применение современных методов визуализации в оценке состояния и прогнозировании развития патологических рубцов // Медицина. 2017. №3. С. 58-75.

10А. Мартусевич А.К., Янин Д.В., Богомолова Е.Б., Галка А.Г., Клеменова И.А., Костров А.В. Возможности и перспективы применения СВЧ-томографии в оценке состояния кожи // Биомедицинская радиоэлектроника. 2017. №12. С. 3-12

11А. Янин Д.В., Галка А.Г., Костров А.В., Привер С.Э., Смирнов А.И. Резонансный СВЧ-датчик давления газа // Приборы и техника эксперимента. 2017. №2. С. 156-157.

12А. Янин Д.В., Галка А.Г., Смирнов А.И., Костров А.В. Диагностика подповерхностных неоднородностей среды квазистатическими электрическими полями резонансных СВЧ-зондов // Журнал радиоэлектроники. 2016. №1. С. 1-18.

13А. Янин Д.В., Галка А.Г., Смирнов А.И., Костров А.В., Стриковский А.В., Орлинская Н.Ю., Епишкина А.А., Гребенкин Е.В. Неинвазивная диагностика меланомы и других новообразований кожи методом резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования // Журнал радиоэлектроники. 2015. №1. С. 1-16.

14А. Янин Д.В., Галка А.Г., Смирнов А.И., Костров А.В., Стриковский А.В. Резонансная ближнепольная СВЧ-диагностика неоднородных сред // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2, №6. С. 555-570.

15А. Yanin D.V., Galka A.G., Kostrov A.V., Smirnov A.I., Strikovskiy A.V., Kuznetsov I.V. Diagnostics of subsurface quasi-one-dimensional inhomogeneities by the method of resonance near-field microwave sounding // Radiophysics and Quantum Electronics. 2014. V. 57, I. 1. P. 31-42.

16А. Дурново Е.А., Глявина И.А., Клочков А.С., Шашурина С.В., Галка А.Г., Янин Д.В. Способ прогнозирования направленности развития процесса заживления гнойных и инфицированных ран лица у детей. Патент РФ на изобретение № 2624352, 03.07.2017, Бюл. № 19.

17A. Martusevich A.K., Petrov S.V., Galka A.G., Golygina E.S. The Study of Dielectric Properties of Biological Tissue under Thermal Modification in vitro // Journal of Stress Physiology & Biochemistry. 2019. V. 15, № 1. P. 41-45.

18A. Мартусевич А.К., Краснова С.Ю., Галка А.Г., Епишкина А.А.. Оценка функционального состояния кожных и подкожных структур у животных и человека методом резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования // Журнал стресс-физиологии и биохимии. 2018, Т. 14, С. 31-34.

19A. Martusevich A.K., Galka A.G., Krasnova S.Yu., Soloveva A.G., Kostrov A.V. Near-field microwave sensing of human skin: physiological pattern // Archiv Euromedica 2018. V. 8, №2. P. 120.

20A. Мартусевич А.К., Краснова С.Ю., Галка А.Г., Голыгина Е.С., Янин Д.В. Ближнепольное СВЧ-профилирование кожи и подкожных структур крыс при экспериментальном термическом ожоге // Комбустиология. 2018. P. 61-62.

21A. Martusevich A.K., Galka A.G., Krasnova S.Yu., Yanin D.V., Bogomolova E.B. Study of dielectric properties of human skin: the first experience of microwave probing // International journal of applied and fundamental research. 2017. № 3. P. 1-2 URL: www.science-sd.com/471-25231.

22A. Галка А.Г., Янин Д.В., Костров А.В., Климов С.И., Новиков Д.И. Резонансный зонд для измерения плотности и флуктуаций ионосферной плазмы на микро- и наноспутниках // Труды конференции молодых ученых "Взаимодействие полей и излучения с веществом", Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН), 2017. С.173-175

23A. Yanin D.V., Galka A.G., Kostrov A.V., Zagainov V.E., Vasenin S.A. Investigation of electrodynamics parameters of biological tissues // 3rd International Conference «Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications», EPJ Web Conf., 195, 2018.

24A. Andrew K. Martusevich, A.G. Galka, S.Yu. Krasnova and A.G. Soloveva. Microwave imaging of skin damage at experimental burns // 3rd International Conference «Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications», EPJ Web Conf., 195, 2018.

25A. Yanin D. V., Galka A. G., Kostrov A. V., Smirnov A. I., Strikovskiy A. V. Resonant near-field microwave sensor for research of dynamic characteristics of vacuum system // 25th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo2015), Sevastopol. 6-12 Sept.2015

26A. Мартусевич А.К., Галка А.Г., Краснова С.Ю., Перетягин П.В., Дубкова Е.С. Исследование диагностической ценности ближнепольного СВЧ-зондирования кожи при модельной термической травме // Труды Международной конференции «Термические поражения и их последствия». М. 2017. – С. 119-120

27A. Yanin D.V., Galka A.G., Kostrov A.V., Zagainov V.E., Vasenin S.A. Investigation of electrodynamics parameters of biological tissues // 3rd International Conference «Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications»(TERA-2018), EPJ Web Conf., 195 (2018) 08007

28А. Гайкович К.П., Галка А.Г., Мартусевич А.К., Смирнов А.И., Янин Д.В. Экспериментальное исследование ближнепольной резонансной СВЧ диагностики биологических сред // Труды XI Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь (Москва, 27-29 ноября 2017 г.) – ИРЗ РАН, с. 217-221

29А. Галка А.Г., Янин Д.В., Епишкина А.А., Костров А.В. «Эффект прижима» в ближнепольной СВЧ-томографии меланомы кожи // Труды XI международной научно-практической конференции «Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования в физиологии и медицине». 15–16 ноября 2016 г., Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, с. 26-27

30А. Andrew K. Martusevich, Galka A.G., Krasnova S.Yu., Petrov S.V., Novikov A.V. Diagnostic value of microwave imaging of dielectric tissues properties in patients with Dupuytren disease // 3rd International Conference «Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications»(TERA-2018), EPJ Web Conf., 195 (2018) 08003

31А. Yanin, D.V., Galka, A.G., Kostrov, A.V., Smirnov, A.I., Strikovskiy, A.V. Noninvasive diagnostics of the melanoma using the method of near-field microwave sounding CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology. Sevastopol, Crimea, Ukraine. Conference Proceedings, 14 November 2014, Article number 6959748, Pages 1036-1037

32А. Галка А.Г., Янин Д.В., Смирнов А.И., Костров А.И., Стриковский А.В. Неинвазивная диагностика меланомы и других новообразований кожи методом резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования. Труды II Всероссийской микроволновой конференции, Москва, 26-28 ноября 2014 г. С. 503-508

33А. Yanin D.V., Galka A.G., Kostrov A.V., Smirnov A.I., Strikovskiy A.V. «Pressing effect» in near-field microwave diagnostics of biological tissues // CriMiCo 2013 - 2013 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings 2013, Article number 6652660, Pages 1067-1068

34А. Smirnov A.I., Yanin D.V., Kostrov A.V., Galka A.G., Strikovskiy A.V. Resonance near-field microwave probing of pathological processes in skin tissues. CriMiCo 2012 - 2012 22nd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. 2012, Article number 6336275, Pages 983-984

35А. Andrew K. Martusevich, Galka A.G., Krasnova S.Yu., Yanin D.V., Kostrov A.V. Comparative study of dielectric properties of the skin of human and laboratory animals // 3rd International Conference «Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications»(TERA-2018), EPJ Web Conf., 195 (2018)

ГАЛКА Александр Георгиевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА
БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ДИАГНОСТИКИ
ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕД**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 3.07.2019 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ №56(2019)

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46