

“УТВЕРЖДАЮ”

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Институт  
общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук,  
член-корреспондент РАН



  
С.В. Гарнов

“ 10 ” октября 2019 г

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**на диссертацию Галки Александра Георгиевича**

«Развитие метода ближнепольной резонансной диагностики параметров диэлектрических сред», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика

Диссертационная работа Александра Георгиевича Галки посвящена разработке методов ближнепольной СВЧ диагностики и исследованию электродинамических свойств однородных и неоднородных материальных сред.

Ближнепольная СВЧ-диагностика имеет преимущество по сравнению с методами оптического и инфракрасного диапазонов в высокой проникающей способности зондирующего излучения до нескольких сантиметров внутрь биологических объектов без нарушения их жизненных функций. Ее пространственная разрешающая способность позволяет восстанавливать структуру исследуемого объекта с точностью, намного меньшую длину волны.

В отличие от волновых методов, ближнепольная диагностика не ограничена дифракционным пределом.

В рамках резонансной ближнепольной СВЧ-диагностики зондирование среды осуществляется квазистатическим электрическим полем, локализованным вблизи электрически малой антенны. Располагая в области «ближнего» поля исследуемый объект, эта диагностика позволяет 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. В разработанном диагностическом методе частота зондирующего квазистатического поля антенны выбирается из условия, чтобы характерный масштаб его локализации был меньше глубины скин-слоя в исследуемой среде. В разработанных автором вариантах ближнепольных резонансных измерительных системах основными источниками диагностической информации являются смещение и уширение резонансной кривой. Основное достоинство представленных автором резонансных датчиков – их миниатюрность, высокая чувствительность к малым изменениям параметров среды, в которую они помещены, а также гибкие функциональные возможности.

**Целью диссертационной работы является** разработка физических и математических основ метода резонансной ближнепольной 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 ближнепольной томографии на примере подповерхностной диагностики проводящих сред.

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



содержание работы отражает поэтапное решение задач, позволяющее достичь поставленной в диссертации цели.

Во **введении** автор обосновывает выбранного исследования электродинамических свойств однородных и неоднородных материальных сред, показывает актуальность темы диссертационной работы, приводит цель работы и задачи, которые были решены для достижения заявленной цели, обосновывает научную новизну, практическую ценность результатов работы, перечисляет основные положения, выносимые на защиту, указывает степень достоверности и апробацию результатов.

В **первой главе** диссертации приведена электродинамическая модель резонансной измерительной системы для ближнепольного зондирования материальных сред. Основные элементы измерительной системы. 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 резонансный отклик зонда с исследуемыми параметрами среды. В **разделе 1.1.1** рассмотрены измерительные системы в виде резонатора на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии для измерения концентрации плазмы и резонатора на полуволновом отрезке коаксиальной линии для диагностики давления газа. В **разделе 1.1.2** применительно к подповерхностной диагностике 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 (**раздел 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.

**Вторая глава** 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 главе проведено теоретическое исследование диагностик и получены выражения для амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик измерительных систем, установлена связь между выходным сигналом датчиков и параметрами среды. В **разделе 2.1** развитая методика применена 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 проводах, образующих резонатор, столкновительные потери в плазме, потери на излучение, а также потери на связь резонатора с линиями возбуждения и приема сигнала. Показано, что последний вид потерь вносит определяющий вклад в общую добротность резонатора. Также представлена схема амплитудно-фазовых измерений. 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 **разделе 2.2** разработан и изготовлен резонансный СВЧ-датчик с собственной частотой 1031.6 МГц и добротностью 450. В **разделе 2.2.1** представлено описание измерительной системы на полуволновом отрезке коаксиальной линии с продольными прорезями для заполнения газом объема резонатора. 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%.

**Третья глава** посвящена разработке и апробации в клинических условиях измерительных систем для неинвазивной диагностики биологических тканей на основе метода резонансного ближнепольного зондирования. В **разделе 3.1** рассмотрены особенности конструкции изготовленных датчиков на основе высокочастотных резонаторов и описана методика подповерхностного зондирования. В **разделе 3.2** рассмотрен эффект «прижима», характеризующийся зависимостью показаний ближнепольного измерительного датчика от силы его давления на поверхность биообъекта. Предложены конструктивные решения, позволяющие свести к минимуму негативное влияние «прижима». В **разделе 3.3** представлены результаты экспериментального исследования возможностей метода ближнепольного СВЧ-зондирования для диагностики различных заболеваний с помощью системы датчиков с разными глубинами зондирования. В **разделе 3.3.1** продемонстрирована диагностическая и прогностическая ценность резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования для неинвазивной диагностики меланомы кожи и для диагностики термической травмы в **разделе 3.3.2**. Показана информативность проведения резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования тканей в неинвазивном мониторинге их структуры при термической травме.

**Четвертая глава** 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. В **разделе 4.2** приведено описание конструкции резонансных датчиков, измерительная часть которых изготовлена из отрезков двухпроводной линии. В **разделе 4.3** найдена в рамках модели плоскостной

среды аналитическая связь комплексной диэлектрической проницаемости среды с импедансом зондирующей антенны. В **разделе 4.4** приведено описание эксперимента и обоснование выбранной конструкции датчиков для подповерхностной диагностики водоносных слоев в грунте. В **разделе 4.5** представлены экспериментальные результаты. В **разделе 4.5.1** проведено экспериментальное измерение глубины зондирования датчиков в зависимости от расстояния между измерительными проводами и влажности песка. В **разделе 4.5.2** экспериментально продемонстрирован способ определения поперечных границ неоднородности в песке. В **разделе 4.5.3** экспериментально показана реализация алгоритма нахождения глубины залегания водного объема в песке различной влажности. В **разделе 4.5.4** показана реализация алгоритма восстановления геометрических и электродинамических параметров неоднородной среды в виде песчано-водной смеси в форме прямоугольного параллелепипеда во влажном песке.

В **приложении** диссертации впервые предложена развитая амплитудно-фазовая методика измерений концентрации плазмы с помощью СВЧ-зонда для разработки датчика параметров ионосферной плазмы на борту микроспутника «Трабант».

В **заключении** диссертации представлены основные результаты проведенных в ходе исследований научных задач, выводы по результатам проведенного исследования.

**Наиболее значимыми научными результатами** диссертационной работы А.Г. Галки, представляющими практический и научный интерес, являются следующие:

- применение амплитудно-фазового метода для диагностики концентрации плазмы с помощью резонансного СВЧ-зонда на отрезке двухпроводной линии, позволяющее существенно увеличить диапазон измеряемых значений концентрации плазмы, не увеличивая геометрических размеров датчика;
- разработка и реализация метода резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования, который можно эффективно использовать в медицинских



приложениях: для неинвазивной диагностики меланомы, для диагностики глубинной структуры кожи и изменений в них, возникающих в условиях ожога;

- применение развитого амплитудно-фазового метода, для диагностики давления газа в широком диапазоне значений с помощью резонансного СВЧ-датчика на отрезке коаксиальной линии;
- путем глубинного сканирования системой резонансных датчиков с разным масштабом локализации зондирующего электрического поля показано восстановление подповерхностной структуры комплексной диэлектрической проницаемости среды;
- амплитудно-фазовый метода применен для уменьшения минимально измеряемого значения концентрации плазмы без увеличения габаритов резонансного СВЧ-зонда, что позволяет использовать его для диагностики параметров ионосферной плазмы на борту микроспутника;

**Научная ценность работы** обусловлена тем, что в ней развит и реализован амплитудно-фазовый метод для измерения концентрации плазмы резонансным СВЧ-зондом; разработан и апробирован резонансный датчик давления газа на полуволновом отрезке коаксиальной линии; разработан и реализован метод ближнепольного СВЧ-зондирования для неинвазивной подповерхностной диагностики биологических тканей в медицинских целях; показаны различия диэлектрических свойств здоровой кожи, невуса и меланомы; предложен новый метод диагностики параметров ионосферной плазмы на борту микроспутника с помощью резонатора на отрезке двухпроводной линии; предложен и экспериментально реализован метод резонансной ближнепольной СВЧ-томографии применительно к малоглубинному зондированию земли.

#### **Практическая 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.

Малогабаритные датчики концентрации плазмы могут быть применены для контроля и автоматизации технологического процесса на промышленных установках с вакуумным плазменным напылением. Разработанный в диссертации амплитудно-фазовый метод нашел практическое применение и впервые использован для измерения концентрации ионосферной плазмы и ее возмущений на борту микроспутника «Трабант» с высотой орбиты 500 км. Разработаны компактные манометрические датчики давления с широким диапазоном измеряемых значений и высоким временным разрешением могут применяться для динамического контроля давления газа на вакуумных установках. Предложена методика подповерхностного зондирования проводящих сред может быть использована в различных практических приложениях (например, в археологии, дефектоскопии). Разработаны медицинские датчики 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 комбустиологии с целью мониторинга состояния ожоговой раны.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** подтверждаются тем, что:

- описан теоретически амплитудно-фазовый метод измерения малых вариаций диэлектрической проницаемости однородных сред;
- разработан и экспериментально реализован резонансный СВЧ-зонд на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии с собственной резонансной частотой 2 ГГц для измерения концентрации лабораторной плазмы и датчик давления газа на полуволновом отрезке коаксиальной линии;
- разработан и экспериментально апробирован метод резонансной ближнепольной СВЧ томографии для подповерхностного зондирования



неоднородных проводящих сред на примере модельной задачи по поиску глубины залегания и поперечных размеров неоднородности в виде водной полости в форме прямоугольного параллелепипеда, расположенной во влажном однородном песке;

– разработана конструкция датчика параметров ионосферной плазмы для установки на борту микроспутника «Трабант»

– результаты исследований представлены в 20 научных статьях, которые опубликованы в рецензируемых зарубежных и отечественных журналах из перечня ВАК, а также были доложены на многочисленных международных конференциях и российских конференциях с международным участием.

**Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования** в организациях, ведущих исследования в области физики плазмы, радиофизики, в исследованиях космического пространства, - НИЦ "Курчатовский институт", ИОФ РАН, ИПФ РАН, РТУ МИРЭА, НИЯУ «МИФИ», РТУ МИРЭА, ГК Роскосмос.

**Недостатками работы являются:**

1) Недостаточно четко описаны условия проведения экспериментов по применению ближнепольной СВЧ - диагностике структуры биологических сред и статистические характеристики полученных данных.

2) Недостаточно четко изложен вопрос ухода излучения от антенны вглубь изучаемой среды, и учет этого явления при определении параметров среды методом ближнепольной СВЧ - диагностики.

Указанные замечания не снижают положительной оценки диссертации Галки Александра Георгиевича. Работы А.Г. Галки, представленные в диссертации, внесли вклад в радиофизику. Представленная диссертационная работа является целостным научным трудом, вклад автора в который является определяющим. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Достоверность полученных А.Г. Галкой результатов подтверждается их публикацией в ведущих рецензируемых иностранных и отечественных научных журналах, а также представленными докладами на международных и

российских конференциях. Эти работы известны специалистам в данной области радиофизики и цитируются в научных изданиях.

В целом в представленной диссертантом работе решена задача разработки физических и математических основ метода резонансной ближнепольной СВЧ-диагностики диэлектрических и проводящих сред, исследование возможностей практического применения полученных результатов для измерения параметров плазмы, давления газов, диагностики биологических тканей. Построена электродинамическая модель резонансной измерительной системы для ближнепольного СВЧ-зондирования материальных сред.

В лице А.Г. Галки мы несомненно имеем высокопрофессионального специалиста, знания и умения которого безусловно отвечают высоким требованиям, предъявляемым к учёным, достаиваемым степени кандидата физико-математических наук.

Оригинальные результаты диссертации, безусловно, являются достижением в области экспериментальных исследований электродинамических свойств однородных и неоднородных материальных и биологических сред.

Диссертация А.Г. Галки полностью удовлетворяет требованиям, изложенным в пунктах 9 – 11, 13 и 14 действующего "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 01 октября 2018 г. № 1168), предъявляемым к диссертационным работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Галка Александр Георгиевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

Отзыв составлен старшим научным сотрудником ИОФ РАН, кандидатом технических наук по специальности 01.04.03 «Радиофизика» Степахиным Владимиром Дмитриевичем, тел.: (8)-499-503-87-77, доб. 5-82, email: stepakhin@fpl.gpi.ru, адрес: 119991, г. Москва, ул. Вавилова д. 38, на основе



обсуждения содержания диссертации на семинаре отдела физики плазмы ИОФ РАН, который состоялся 03 октября 2019 г.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого совета отдела физики плазмы, протокол № 456 от 03 октября 2019 г.

С обработкой моих личных данных, связанных с защитой диссертации, согласен.

Старший научный сотрудник  
отдела физики плазмы ИОФ РАН, к.т.н.



Степахин В.Д.

Подпись старшего научного сотрудника к.т.н. Степашина В.Д. заверяю

ВРИО ученого секретаря ИОФ РАН, д.ф.-м.н.



В.В. Глушков

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38  
тел.: +7 499 503 8734

e-mail: [nauka@gpi.ru](mailto:nauka@gpi.ru)

<http://www.gpi.ru/>