

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе А.Г. Галки «Развитие метода ближнепольной резонансной диагностики параметров диэлектрических сред», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика

Диссертационная работа А.Г. Галки посвящена развитию и экспериментальной реализации метода резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования однородных и неоднородных сред. Суть данной диагностики заключается в восстановлении электродинамических характеристик среды по измерениям импеданса электрически малой антенны, включенной в качестве нагрузки в колебательную систему, параметры которой - резонансная частота и добротность - изменяются при внесении среды в область зондирующего электрического поля. Приложения данного метода практически важны для целого ряда задач, в том числе для измерения локальных параметров лабораторной и космической плазмы, подповерхностного СВЧ-зондирования проводящих сред в геологоразведке и, не в последнюю очередь, для неинвазивной диагностики различных заболеваний в медицине и дефектоскопии, где в силу труднодоступности и удаленности диагностируемых объектов а также для предотвращения нежелательных последствий от внешних контактов необходимо создание бесконтактных методов диагностики. Широкие возможности на пути совершенствования бесконтактных методов диагностики открывает использование резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования, позволяющего исследовать пространственное распределение комплексной диэлектрической проницаемости объектов с разрешением существенно меньше, чем длины волны излучения. 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. Таким образом, актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, приложения и списка цитируемой литературы из 142 наименований. По структуре и объему работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Во введении дан краткий обзор современного состояния методов диагностики электродинамических свойств различных сред убедительно демонстрирующий необходимость дальнейшего развития СВЧ-диагностики. Далее сформулирована цель работы и поставлены задачи, аргументирована их научная новизна, сформулированы защищаемые положения, выносимые на защиту, показана достоверность и практическая значимость результатов исследования.

Первая глава диссертации посвящена математическому описанию резонансной измерительной системы для ближнепольного СВЧ-зондирования, основными элементами которой являются ближнепольная антенна и резонатор на распределенном отрезке длинной линии. Целью теоретического описания являлось получение аналитической связи между сдвигом и уширением резонансного отклика датчика и электродинамическими параметрами среды, находящейся в ближнем поле измерительной системы. Для этого предложен эффективный метод замены описания электромагнитной системы с распределенными параметрами рассмотрением соответствующей электротехнической цепи со сосредоточенными параметрами. В результате построена электродинамическая модель, позволяющая в общем виде моделировать работу датчика при вариации электродинамических параметров среды в широком диапазоне значений комплексной диэлектрической проницаемости. В частном случае рассмотрены несколько типов измерительных систем и получены упрощенные выражения, связывающие собственную

частоту и добротность резонансной измерительной системы с диэлектрической проницаемостью и проводимостью среды.

Во второй главе диссертации рассматривается задача диагностики концентрации слабозамагниченной плазмы. В качестве ближнепольной системы для локального измерения плотности плазмы используется резонансный СВЧ-зонд, выполненный на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии. Автором разработана методика определения малых значений концентрации плазмы, существенно расширяющая диагностические возможности СВЧ-зонда. Экспериментальная апробация развитой методики проводилась на плазменном стенде «ИОНОСФЕРА». Продемонстрировано, что использование амплитудно-фазового метода позволяет понизить минимально измеряемое значение плотности на три порядка. С помощью развитой методики измерено пространственное распределение концентрации по радиусу. Показано, что при сохранении локальности измерений, использование предложенного метода позволяет увеличить пространственный масштаб измерений в два раза и определять низкие значения плотности плазмы на периферии плазменного столба. Для демонстрации возможностей развитого метода разработан и изготовлен резонансный СВЧ-датчик давления газа на полуволновом отрезке коаксиальной линии с продольными прорезями для заполнения газом объема резонатора. Экспериментально установлено, что минимальное давление, регистрируемое датчиком, а также его чувствительность составляет порядка 10^{-4} относительно максимального значения. Верхняя граница давления, до которой проводилось тестирование датчика, равнялось 2 атм. Высокое временное разрешение датчика давления на уровне 10^{-7} с, определяемое добротностью резонатора, позволило осуществить диагностику нестационарных газовых процессов.

В третьей главе диссертации представлены результаты экспериментального исследования метода ближнепольного зондирования применительно к медико-биологической диагностике кожи системой резонансных СВЧ-датчиков с разными глубинами зондирования. Измерение электродинамических параметров среды осуществлялось краевой емкостью цилиндрического конденсатора, входящей в состав резонансной измерительной системы. Метод тестировался и калибровался в контролируемых условиях по измерениям двухслойной среды (спирт-тефлон). Показана диагностическая и прогностическая ценность разработанного метода ближнепольного СВЧ-зондирования для ряда прикладных задач. Проведено зондирование подповерхностного профиля комплексной диэлектрической проницаемости здоровой кожи человека которое продемонстрировало различие интегрального профиля кожи кисти и мозолистого участка ладони. Измерения вариация профиля диэлектрических параметров кожи в области новообразований показали существенное отличие электродинамических характеристик меланомы от показателей здоровой кожи. Результаты этих исследований могут быть использованы для неинвазивной диагностики кожных новообразований. Также показана возможность оценки состояния кожи и подкожных структур в области ожога и обнаружено увеличение мнимой части эффективной диэлектрической проницаемости обожженного участка на глубинах 2-4 мм. Важно подчеркнуть, что диагностировать стадию ремиссии ожоговых ран можно без снятия раневых повязок.

Четвертая глава диссертации посвящена подповерхностной диагностике неоднородных проводящих сред методом резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования. В рамках данной главы рассматривается модельная задача по исследованию сред, содержащих квазиодномерные неоднородности с резкими границами. Изготовлена система резонансных датчиков с различной глубиной зондирования. Разработан и экспериментально реализован алгоритм восстановления электрических и геометрических параметров неоднородностей в виде объемных полостей с жидкостью, расположенных во влажном песке. Теоретически и экспериментально исследована чувствительность датчиков в зависимости от влажности песка. Установлено, что с увеличением влажности ухудшается точность восстановления глубины залегания неоднородности. Данная задача

имеет прикладной характер исследования и может быть востребована, например, в геологоразведке при поиске диэлектрических неоднородностей, водоносных слоев и пустот в грунте.

В приложении к диссертации предложена и разработана методика измерения параметров ионосферной плазмы на борту малогабаритного спутника с помощью резонансного СВЧ-зонда. Локальность метода позволит исследовать мелкомасштабные пространственные неоднородности плотности плазмы, а широкий частотный диапазон датчика до 1 МГц, определяемый добротностью резонатора, позволит фиксировать малые флуктуации концентрации плазмы, связанные с волновыми процессами в ионосфере. Тестирование измерительной системы проводилось на уникальной крупномасштабной плазменной установке «ИОНОСФЕРА» (ИПФ РАН) в масштабе 1:1. В результате измерений было установлено, что датчик уверенно регистрирует значение концентрации плазмы в диапазоне 10^3 - 10^3 см⁻³, характерном для высоты орбиты полета спутника.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации.

По работе имеются следующие замечания.

1. В ходе экспериментальной реализации амплитудно-фазового метода применительно к измерению плотности плазмы говорится о достаточно высокой точности - порядка 5%, которая рассчитана путем сопоставления данных, полученных с помощью малогабаритного СВЧ-зонда с использованием вышеуказанной методики и аналогичного по конструкции зонда больших размеров с применением классического способа измерений по сдвигу максимума резонансной кривой. Имело бы смысл сопоставить результаты измерений с другими независимыми диагностиками (интерферометр, электрический зонд и др.).

2. При измерениях относительно низких значений плотности плазмы продемонстрирована высокая чувствительность измерительной системы. Справедливость данных результатов оправдано в предположении однородного распределения концентрации вблизи резонатора. Известно, что вблизи металлического объекта в плазме значение концентрации меньше, нежели вдали. В предположении неизменного характера диффузионного распада плазмы данный эффект должен был привести к изменению экспоненциального хода кривой $N_e(t)$. В эксперименте этого не наблюдалось. Вопрос, с чем связано это явление, остался невыясненным.

3. При рассмотрении методов подповерхностной диагностики в четвертой главе преимущества предлагаемого СВЧ метода по сравнению использованием георадара обсуждаются в основном с технической стороны, а вопросы точности и информативности остаются недостаточно прояснены.

4. Как известно, в ионосферной плазме влияние геомагнитного поля на электродинамические свойства плазмы существенны. Однако при рассмотрении определения плотности плазмы с помощью резонансного СВЧ-зонда (глава 3 и приложение) этому вопросу уделяется мало внимания и остается не ясным, насколько можно ли пренебречь влиянием магнитного поля на результаты измерений, например, по сравнению с обсуждаемым влиянием вариаций температуры.

5. Имеются некоторые замечания по оформлению диссертационной работы. В тексте встречаются опечатки:

5.1. На рисунке 3.6 стоит неверный знак перед мнимой частью эффективной диэлектрической проницаемостью.

5.2. Список литературы оформлен не в едином формате.

5.3. На стр. 53 в слове «схемы» пропущена буква «ь» на конце и т.д.

Однако, отмеченные недостатки не являются принципиальными и ни в коей мере не снижают общей положительной оценки диссертации.

По совокупности полученных результатов диссертационная работа Галки А.Г. представляет собой научно-квалифицированную работу, посвященную решению актуальной задачи радиофизики. Самостоятельность и оригинальность исследования, включая личный вклад автора, а также практическая значимость результатов, не вызывают сомнений. Основные выводы и положения, выносимые на защиту, представляются обоснованными и достоверными. Результаты всех экспериментов сопоставлены с теоретическими оценками.

Диссертация написана ясным языком, снабжена значительным количеством рисунков и оформлена в соответствии с установленными правилами ВАК. Основные результаты изложены в научных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, в том числе в 15 статьях, индексируемых международными базами данных WoS и Scopus, а также доложены на различных всероссийских и международных конференциях и семинарах. Автореферат диссертации написан понятным языком, в полной мере отражает ее суть и содержит все требуемые разделы.

Считаю, что диссертационная работа в полной мере удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор Александр Георгиевич Галка заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института Земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН


А. С. Волокитин

Контактная информация:

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
108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4
Тел.: +7 (495) 851-09-13, e-mail: volokitin@space.ru, avol@izmiran.ru

Подпись А. С. Волокитина заверяю:

Ученый секретарь

Института Земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
кандидат физико-математических наук


А.И.Рез

Я, Волокитин Александр Сергеевич, даю свое согласие на включение персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного Совета, и их дальнейшую обработку.

«7» октября 2019г.


А. С. Волокитин