

ОТЗЫВ

официального оппонента
о диссертационной работе Галки Александра Георгиевича
«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 метода резонансной ближнепольной СВЧ диагностики материальных сред и его экспериментальной реализации применительно к определению концентрации плазмы, давления газов, параметров биологических тканей, а также подповерхностному зондированию неоднородных проводящих сред. Сущность рассматриваемого метода состоит в определении изменений резонансных характеристик колебательной системы, включающей резонатор и подключенную к нему антенну малых электрических размеров, при внесении в ближнее поле такой антенны исследуемых образцов и установлении связи между характеристиками измерительной системы и параметрами данных образцов. Метод ближнепольной СВЧ диагностики материальных сред, получивший достаточно широкое развитие за последние два десятилетия, дает возможность восстанавливать электродинамические параметры сред без непосредственного физического контакта с ними, что делает его востребованным в таких областях как медицина, геологоразведка, дефектоскопия. При этом использование резонатора в составе измерительной системы позволяет повысить ее чувствительность и регистрировать весьма малые изменения значений параметров сред. Следует отметить, что ряд вопросов повышения чувствительности данного метода, а также интерпретации получаемых с его помощью результатов остается еще недостаточно изученным. Возникающие здесь трудности связаны, в частности, с тем, что для восстановления профиля комплексной диэлектрической проницаемости зондируемой среды необходимо, как правило, построение электродинамической модели измерительной системы с учетом не только ее конструктивных особенностей, но и физической специфики исследуемых объектов. Отмеченные обстоятельства, требующие совершенствования метода ближнепольной резонансной диагностики сред, делают тему диссертационного исследования весьма актуальной.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, приложения, заключения и списка литературы.

Во введении дан обзор современного состояния исследуемой проблемы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту, отмечена новизна полученных результатов, кратко изложено содержание работы.

В первой главе диссертации рассмотрена 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. С помощью пересчета импедансов вдоль длинной линии получено выражение для тока на выходе измерительной системы, позволяющее анализировать связь между ее резонансными характеристиками (собственной частотой и амплитудой выходного сигнала при резонансе) и комплексной диэлектрической проницаемостью исследуемой среды. В рамках данного подхода рассчитаны характеристики таких измерительных систем как четвертьволновой резонатор на отрезке двухпроводной линии для диагностики параметров плазмы, коаксиальный полуволновой резонатор для измерения давления газа, резонатор с «неполным» подключением измерительной антенны для диагностики биологических тканей, резонатор с ближнепольной антенной в виде отрезка

двухпроводной линии для подповерхностного зондирования неоднородных проводящих сред.

Вторая глава диссертации посвящена развитию амплитудно-фазового метода определения малых вариаций диэлектрической проницаемости сред на примере резонансных систем для измерения концентрации плазмы (плазменный СВЧ зонд с резонатором на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии) и давления газа (коаксиальный полуволновой резонатор). Работа таких систем основана на определении диэлектрической проницаемости среды, величина которой зависит от концентрации ее частиц (электронов плазмы или молекул газа). Проведен теоретический анализ амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик измерительных систем, установлена связь между выходным сигналом датчика и параметрами среды. Применительно к определению концентрации электронов плазмы рассматриваемый метод позволяет расширить диапазон измеряемых локальных значений концентрации без увеличения размеров СВЧ зонда. Выполнена экспериментальная апробация метода на примере малогабаритного зонда с собственной резонансной частотой 2 ГГц. Показано, что предложенный подход позволяет увеличить динамический диапазон СВЧ зонда вниз по концентрации плазмы на три порядка. При этом полный диапазон измеряемых значений концентрации составляет пять порядков. С помощью развитого метода измерено радиальное распределение концентрации плазмы на установке ИПФ РАН «Ионосфера». Применительно к определению давления газа разработана и реализована резонансная диагностическая система для измерения давления газа в вакуумных системах и регистрации изменений давления во времени при инъекции молекулярных пучков. Получены калибровочные кривые, позволяющие установить связь между выходным сигналом на приемной аппаратуре и давлением газа при определенной температуре.

В третьей главе диссертации разработана и апробирована в условиях клиники измерительная система для неинвазивной диагностики биологических тканей. Рассмотрены особенности конструкции датчиков на основе высокочастотных резонаторов и описана методика подповерхностного зондирования тканей. В качестве зондирующей антенны (измерительного аппликатора) используется краевая емкость цилиндрического конденсатора, позволяющая реализовать необходимые глубины зондирования кожи от 1 до 5 мм. Для уменьшения эффекта прижатия, возникающего при соприкосновении измерительного аппликатора с мягкими тканями кожного покрова, предложено и реализовано конструктивное решение в виде динамометрического устройства, позволяющего контролировать силу прижатия датчика к коже. Для неинвазивной диагностики кожи изготовлены датчики, имеющие различную глубину зондирования. Глубина зондирования датчика определяется максимальным расстоянием от измерительного аппликатора до неоднородности в среде, при котором измерительная система регистрирует эту неоднородность. Далее представлены экспериментальные результаты использования метода ближнеполюсного СВЧ зондирования применительно к диагностике меланомы. С помощью датчика, имеющего глубину зондирования 1,1 мм, измерены интегральные диэлектрические свойства кожи и установлено, что значения диэлектрической проницаемости здоровой кожи и новообразований отличаются примерно в два раза, в то время как родинка и здоровая кожа практически неразличимы по данному показателю. Это свидетельствует о дифференциально-диагностической ценности метода при исследовании новообразований кожи. Кроме того, показана информативность рассматриваемого метода применительно к диагностике ожога, возникающего в условиях термической травмы. Продемонстрировано, что влияние ожога проявляется в уменьшении мнимой части эффективной диэлектрической проницаемости в приповерхностном слое и в возрастании этой величины на глубинах порядка 2–4 мм, что объясняется повышенным влагосодержанием тканей на этих глубинах.

В четвертой главе диссертации на примере модельной задачи поиска проводящих локализованных неоднородностей с резкими границами во влажном грунте выполнено развитие метода ближнеполюсной СВЧ томографии. Решена обратная задача по восстановлению геометрических и электродинамических параметров неоднородностей в форме прямоугольных параллелепипедов в сыром песке. Измерительная часть датчиков,

включенная в резонатор в качестве нагрузки, выполнена на отрезке двухпроводной линии с переменным расстоянием между проводниками. Это расстояние определяет глубину зондирования каждого датчика. Сканирование осуществлялось в лабораторных условиях системой датчиков с глубиной зондирования от 5 до 20 мм. Теоретически рассчитана и экспериментально измерена зависимость глубины зондирования датчика от влажности песка. С помощью разработанного алгоритма найдены неизвестные параметры неоднородности: ее место расположения, поперечные размеры, глубина залегания, электродинамические характеристики. При этом отклонение экспериментальных данных от реальных значений глубины залегания не превышает 20%.

В приложении к диссертации изложены результаты практического применения разработанного амплитудно-фазового метода для измерения концентрации ионосферной плазмы в диапазоне $10^3-10^6 \text{ см}^{-3}$ на борту микроспутника с высотой орбиты 500 км. Разработан макет измерительной системы, удовлетворяющий по массе и размерам условиям применимости на малогабаритных спутниках. Проведены его испытания на плазменной установке ИПФ РАН «Ионосфера» в условиях, близких к ионосферным. Установлено, что датчик уверенно регистрирует концентрацию плазмы в требуемом диапазоне значений. Проработаны в виде готовых схемотехнических решений вспомогательные блоки диагностической аппаратуры.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить, что она представляет собой законченную научную работу, в которой получен ряд новых интересных результатов, весьма важных в практическом плане. Последовательность в проведении экспериментальных исследований, согласованность их результатов с данными теоретических оценок и экспериментальными результатами, полученными другими методами, позволяют считать основные научные результаты диссертации обоснованными и достоверными. Все результаты диссертации имеют ясную физическую интерпретацию. Существенным достоинством работы является то, что полученные результаты и разработанные методы могут быть использованы при создании перспективных устройств для диагностики плазмы, неоднородных диэлектрических сред и биологических тканей. Результаты диссертации будут также весьма полезны для планирования будущих экспериментов в указанных областях.

Личный вклад автора состоит в разработке диагностических систем, реализующих метод резонансного ближнепольного СВЧ зондирования для исследования электродинамических характеристик неоднородных материальных сред, постановке и проведении лабораторных экспериментов, разработке соответствующих теоретических моделей, выполнении интерпретации полученных данных и не вызывает сомнений. Следует отметить большой объем сложных и трудоемких экспериментальных исследований, выполненных диссертантом.

По работе имеются следующие замечания.

1. При теоретическом описании резонансной измерительной системы в главе 1 автором не учитывается магнитная связь между возбуждающей и приемной рамками. Следовало бы обосновать это допущение.

2. При расчете резонатора с ближнепольной антенной в виде отрезка двухпроводной линии используется выражение для волнового сопротивления линии (1.17), справедливое при условии, когда расстояние между проводниками много больше диаметра провода. Поскольку далее это приближенное выражение применяется для анализа выходного тока в случае весьма малых изменений диэлектрической проницаемости среды вблизи измерительной части системы, остается неясным, как пренебрежение малыми поправками в формуле (1.17) повлияет на результаты регистрации данных изменений.

3. Из текста диссертации не вполне ясно, чем определяется минимальная измеряемая концентрация плазмы, и существуют ли возможности измерения разработанным методом еще меньших значений этой величины (например, за счет изменения режима работы датчика).

4. Текст диссертации не свободен от погрешностей изложения:

4.1. В формуле (1.10) для тока I_3 пропущен коэффициент 2 в числителе второго сомножителя, в то время как в конечной формуле (1.11) он присутствует.

4.2. При выводе радиационных потерь СВЧ зонда в формуле (2.3) ошибочно используется распределение заряда вдоль оси зонда, совпадающее с соответствующим распределением тока.

4.3. Для изменения диэлектрической проницаемости в тексте диссертации используются разные обозначения $\Delta\epsilon$ и $\delta\epsilon$ без пояснений, что речь идет об одной и той же величине.

4.4. В списке литературы автор не придерживается единого стиля оформления ссылок; выходные данные ряда публикаций представлены в неполном виде.

4.5. Текст диссертации содержит довольно много мелких опечаток, из которых наиболее заметной является пропуск буквы в термине «амплитудно-фазовый» в заголовке главы 2 (стр. 41), а также соответствующем пункте оглавления (стр. 2).

Отмеченные недостатки не могут влиять на общую положительную оценку диссертационной работы А.Г. Галки, ее научной и практической значимости.

Основные результаты диссертации опубликованы в 35 научных работах, в том числе 1 международном журнале и 14 центральных российских журналах, входящих в список ВАК, а также трудах и сборниках тезисов докладов международных и российских научных конференций; по результатам выполненных исследований получен один патент РФ на изобретение. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, можно заключить, что диссертационная работа А.Г. Галки выполнена на актуальную тему, удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой электродинамики
радиофизического факультета
Национального исследовательского
Нижегородского государственного
университета им. Н. И. Лобачевского



А.В. Кудрин

Контактная информация:

Кудрин Александр Владимирович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой электродинамики радиофизического факультета
Национального исследовательского Нижегородского
государственного университета им. Н. И. Лобачевского,
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского»,
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23,
Тел.: (831) 4623262, e-mail: kud@rf.unn.ru

Подпись доктора физ.-мат наук,
профессора А. В. Кудрина заверяю:
Ученый секретарь
Национального исследовательского
Нижегородского государственного
университета им. Н. И. Лобачевского




Л.Ю. Черноморская