

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии наук»

На правах рукописи

Галка Александр Георгиевич

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

01.04.03 – радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук
А.В. Костров

Нижний Новгород – 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЗОНАНСНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ БЛИЖНЕПОЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕД ..	21
1.1 Импедансный метод расчета электродинамической модели резонансной измерительной системы	24
1.1.1 Четвертьволновый и полуволновый резонаторы для диагностики малых вариаций диэлектрической проницаемости	29
1.1.2 Резонатор с ближнепольной антенной в виде отрезка двухпроводной линии	30
1.1.3 Полуволновый резонатор с неполным подключением измерительной антенны для диагностики проводящих сред	34
1.2 Электродинамическая модель измерительной системы, рассчитанная с помощью теории возмущений для системы телеграфных уравнений	36
1.3 Выводы	39
2. АМЛИТУДНО-ФАЗОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ МАЛЫХ ВАРИАЦИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ	41
2.1 Измерение концентрации плазмы в широком диапазоне значений резонансным малогабаритным СВЧ-зондом	42
2.1.1 Амплитудно-фазовый метод измерения концентрации плазмы	48
2.1.2 Математическое описание датчика концентрации плазмы	53
2.1.3 Экспериментальные результаты	57
2.2 Резонансный датчик давления газа на отрезке коаксиальной линии	62
2.2.1 Описание измерительной системы	64
2.2.2 Экспериментальные результаты	67
2.3 Выводы	72
3. НЕИНВАЗИВНАЯ БЛИЖНЕПОЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД	74
3.1 Резонансные измерительные системы для диагностики биологических тканей	79
3.2 Измерительная часть резонансных ближнепольных систем в виде краевой емкости цилиндрического конденсатора	81
3.3 Резонансная ближнепольная диагностика биологических тканей	84
3.3.1 Диагностика меланомы кожи	89
3.3.2 Оценка состояния ожоговой раны	92
3.4 Выводы	99

4. РАЗВИТИЕ МЕТОДА РЕЗОНАНСНОЙ БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ СВЧ-ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД	102
4.1 Суть метода ближнеполевой СВЧ-томографии	107
4.2 Конструкция датчика для подповерхностного зондирования грунта	108
4.3 Модель трехслойной среды	109
4.4 Описание эксперимента	112
4.5 Экспериментальные результаты	114
4.5.1 Глубина зондирования	114
4.5.2 Определение поперечных границ водоносного слоя	118
4.5.3 Определение глубины залегания водоносного слоя	119
4.5.4 Определение расстояния до границы неоднородности и ее диэлектрических свойств.....	121
4.6 Выводы	123
ПРИЛОЖЕНИЕ. РАЗРАБОТКА ДАТЧИКА ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ДЛЯ МИКРОСПУТНИКА «ГРАБАНТ»	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	142
СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы

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 немаetalлических 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 зависимости 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, выявления 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 основными 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.

Ближнеполюсная СВЧ-диагностика имеет преимущество по сравнению с методами оптического и инфракрасного диапазонов в высокой проникающей способности зондирующего излучения до нескольких сантиметров внутрь биологических объектов. В отличие от волновых методов, ближнеполюсная 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 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.

Научная новизна

1. Впервые развит и реализован амплитудно-фазовый метод для измерения концентрации плазмы резонансным СВЧ-зондом. Показано, что развитый 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 отклонения эффективной проводимости глубинной структуры кожи и ее нарушений, возникающих в условиях ожога.
4. Впервые в мире предложен новый метод диагностики параметров ионосферной плазмы на борту малогабаритного микроспутника с помощью резонатора на отрезке двухпроводной линии.
5. Предложен и экспериментально реализован метод резонансной ближнепольной СВЧ-томографии для подповерхностной диагностики проводящих сред применительно к зондированию поверхности земли. Показано, что глубинное сканирование неоднородных сред можно проводить системой ближнепольных датчиков с разными размерами антенн.

Научная и практическая ценность

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.

Малогабаритные 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 «Трабант» с высотой орбиты 500км. 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 являются прототипом автоматизированного ближнеполюсного 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. Другая созданная серия аппликаторов может быть применена в комбустиологии с целью мониторинга состояния ожоговой раны. Важно подчеркнуть, что СВЧ-зондирование может быть реализовано без снятия раневых покрытий, что в ряде случаев невозможно.

Публикации и апробация результатов

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» ICATT-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.

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, 19 трудов и тезисов в российских и международных конференциях, получен 1 патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора

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 физики РАН и научных конференциях. Все без исключения диагностические системы, на которых проводилась экспериментальная апробация полученных результатов, изготовлены автором лично.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Применение амплитудно-фазового метода для диагностики концентрации плазмы с помощью резонансного СВЧ-зонда на отрезке двухпроводной линии позволяет существенно увеличить диапазон измеряемых значений, 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 ближнепольного СВЧ-зондирования можно эффективно использовать в ряде прикладных задач: для неинвазивной диагностики меланомы, для диагностики состояния и глубинной структуры кожи и подкожных структур, а также изменений в них, возникающих в условиях ожога.

4. Подповерхностную структуру комплексной диэлектрической проницаемости проводящей среды можно восстановить путем глубинного сканирования несколькими резонансными датчиками с разным масштабом локализации зондирующего квазистатического электрического поля, определяемым размером апертуры ближнепольной антенны. Априорная информация о свойствах локализованного включения в однородной проводящей среде позволяет решить обратную задачу по нахождению его геометрических и диэлектрических параметров.

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.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, приложения, заключения и списка 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, основными элементами которой служат резонатор с ближнепольной зондирующей антенной. Связь резонатора с линиями возбуждения и приема сигнала осуществляется магнитными петлями связи у закороченного конца. Применительно к диагностике разреженных сред ближнепольная антенна отсутствует, а зондирование среды осуществляется квазистатическим электрическим полем 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, возбуждающей линиях 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.

Для конкретных конструкций зонда, 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 собственной частотой и амплитудой принимаемого сигнала. В частности, рассмотрены следующие виды измерительных систем: резонатор на отрезке двухпроводной линии для измерения концентрации плазмы и резонатор на полуволновом отрезке коаксиальной линии для диагностики давления газа (**раздел 1.1.1**). Для подповерхностной диагностики неоднородных сред в **разделе 1.1.2** рассчитан резонатор, измерительная часть 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 ближнеполюсной 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.

Глава 2 посвящена развитию амплитудно-фазовой методики определения малых вариаций диэлектрической проницаемости однородных сред на примере измерения концентрации плазмы и давления газа. Данная методика используется в случае малых сдвигов собственной частоты резонансной системы. 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 слабозамагниченной 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 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. 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 на 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 $f_0 = 2034 \text{ МГц}$ и добротностью порядка 150. В качестве независимого метода использовался классический способ измерения концентрации по сдвигу максимума резонансной кривой низкочастотного зонда больших размеров с $f_0 = 420 \text{ МГц}$. Продемонстрировано, 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 $f_0 = 2034 \text{ МГц}$ стандартной методикой по сдвигу максимума резонансной кривой. 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.

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 плазмосоздающего генератора. Стандартная методика на таких временах позволяет проводить измерения концентрации плазмы на расстояниях менее 15 см от центра 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**) в диапазоне от 0.1 Торр до 1 атм 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. Получены калибровочные кривые для аргона, гелия, воздуха (при температуре 22°C), связывающие амплитуду выходного сигнала СВЧ-датчика с давлением исследуемых газов. 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 1 атм. При давлении 1 атм. были рассчитаны диэлектрические проницаемости ϵ исследуемых газов. Получено, что отклонение измеренных величин от табличных данных составляет 5-10%.

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 динамика импульсного напуска газа в вакуумную камеру.

Глава 3 посвящена разработке и апробации в натуральных условиях резонансных измерительных систем для неинвазивной диагностики биологических тканей на основе метода резонансного ближнепольного зондирования. Рассмотрены особенности конструкции изготовленных датчиков на основе высокодобротных резонаторов и описана методика подповерхностного зондирования (**раздел 3.1**). В качестве ближнепольной 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 5мм. 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» путем контроля силы прижатия датчика к биологической ткани с помощью динамометрического устройства, встроенного в измерительный аппликатор. Далее представлены результаты экспериментального исследования метода ближнепольной СВЧ-зондирования подповерхностных диэлектрических неоднородностей системой резонансных датчиков с разными глубинами зондирования применительно к диагностике различных заболеваний (**раздел 3.3**). Экспериментальная апробация резонансной ближнепольной диагностики проводилось 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 измерительной системы.

Продемонстрирована диагностическая и прогностическая ценность резонансного ближнепольного 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 ближнепольного СВЧ-зондирования на удаленных в ходе оперативного вмешательства тканях кожи, содержащих доброкачественные и злокачественные новообразования (родинка – пигментный невус, кератома, меланома). Показана информативность проведения резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования тканей в неинвазивном мониторинге их структуры при термической травме.

В **главе 4** диссертации продемонстрировано развитие метода резонансной ближнепольной СВЧ-томографии применительно к подповерхностной диагностике плоскостойких сред с проводимостью. В **разделе 4.1** раскрывается суть метода ближнепольной СВЧ-томографии, основанной на зондировании среды системой датчиков с разной глубиной зондирования, определяемой размером апертуры ближнепольной антенны. Описание конструкции измерительной системы резонансных датчиков, измерительная часть которых изготовлена из отрезков двухпроводной линии, приведено в **разделе 4.2**. Глубина зондирования каждого датчика определялась расстоянием между измерительными проводами. Для аналитической связи диэлектрической проницаемости и проводимости среды с импедансом зондирующей антенны в **разделе 4.3** развита модель плоскостойкой среды. Для такой модели удалось разработать алгоритм решения обратной задачи по восстановлению внутренней структуры зондируемой среды. В **разделе 4.4** приведено описание эксперимента и обоснование выбранной конструкции датчиков для подповерхностной диагностики водоносных слоев в грунте. Упрощенная модель водоносного слоя представлялась в виде пространства, наполненного подземной водой, расположенного в однородном по составу песке различной влажности. Апробация методики поиска водоносного 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. **Раздел 4.5** посвящен экспериментальным результатам. Здесь введено понятие глубины зондирования датчика и проведено экспериментальное

измерение этого параметра в зависимости от размеров датчика и влажности песка (**раздел 4.5.1**). Результаты измерений сопоставлены с численным расчетом на основе развитой модели. В **разделе 4.5.2** экспериментально продемонстрирован способ определения поперечных границ неоднородности в песке. Для этого датчик с максимальной глубиной зондирования $h_{zond}=20$ мм перемещался вдоль поверхности раздела сред в направлении перпендикулярном измерительным проводам. Кювета была расположена на глубине 3 мм от верхней границы песка. При этом фиксировался сдвиг резонансной частоты в зависимости от положения центра датчика. При сканировании датчиком вдоль границы раздела наблюдалась «ямка» - уменьшение резонансной частоты в области неоднородности. Данная зависимость частоты от координаты x позволяет определить поперечный размер полости с жидкостью L по этой координате 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 залегания водного объема h в песке различной влажности. Для этого датчики с глубиной зондирования $h_{zond} > h$ устанавливались над плоской частью неоднородности, и фиксировались частота и амплитуда резонанса в зависимости от расстояния между измерительными проводами D для пяти датчиков с $D = 5, 9, 10.5, 12.5, 16, 20$. По сдвигу резонансной частоты и изменению амплитуды находилась эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{эфф}$ для каждого датчика. Параметр h находился путем минимизации целевой функции F с помощью модифицированного симплекс-метода Нелдера-Мида, реализованного в качестве готового алгоритма в среде программирования Matlab R2015a. Целевая функция F представлялась в виде среднеквадратичного отклонения между экспериментальными значениями $\varepsilon_{эфф}^{эксп}$ и теоретически рассчитанными $\varepsilon_{эфф}^{теор}(h, D)$ при известных параметрах $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$:

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

Отклонение между экспериментальными результатами и реальными параметрами глубины залегания не превышает 20%. В **разделе 4.5.4** реализуется алгоритм восстановления геометрических и диэлектрических свойств неоднородной среды в виде песчано-водной смеси в форме прямоугольного параллелепипеда во влажном песке. Результаты эксперимента сопоставляются с истинными значениями геометрических размеров неоднородности. В **разделе 4.6** подведен итог проделанной работы и намечены перспективы развития метода резонансной ближнепольной томографии.

В **приложении** диссертации развитая амплитудно-фазовая методика измерений концентрации плазмы впервые была применена для разработки датчика параметров ионосферной плазмы на борту микроспутника «Трабант». На высотах 500 км, там где будет летать спутник, концентрация варьируется в пределах 10^3 - 10^6 см⁻³. При использовании стандартного метода по сдвигу максимума пришлось бы изготовить зонд с размерами порядка 10 м. Это не удовлетворяет массогабаритным требованиям на микроспутниках. Поэтому, было решено изготовить зонд с частотой 180 МГц и использовать развитую методику измерения концентрации. Проведено его лабораторное испытание в условиях, максимально приближенных к ионосферным в масштабе 1:1. Продемонстрирована возможность уверенной регистрации концентрации плазмы в диапазоне 10^3 - 10^6 см⁻³.

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

Список основных публикаций автора по теме диссертации (из списка ВАК)

- 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.

Дополнительный список статей по теме диссертации

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.

Труды и тезисы конференций

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

24A. Галка А.Г., Янин Д.В., Костров А.В., Привер С.Э. Измерение концентрации плазмы в широком диапазоне значений резонансным малогабаритным СВЧ-зондом // Тезисы докладов XLVI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 18-22 марта 2019г, с.187

- 25A. 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) 08005
- 26A. Галка А.Г., Янин Д.В., Костров А.В. Резонансный зонд для измерения плотности и флуктуаций ионосферной плазмы на микро и наноспутниках // Тезисы 13 конференции «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, 12-16 февраля 2018г, С. 196
- 27A. 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
- 28A. Галка А.Г., Янин Д. В., Смирнов А. И., Костров А. В., Стриковский А. В. Резонансная ближнепольная СВЧ-диагностика плазмы и других материальных сред. Тезисы доклада IX конференции "Современные методы диагностики плазмы и их применение", Москва, 5-7 ноября 2014г. С. 78-81.
- 29A. 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 // Сб. научн. тр. Междунар. конф. «Термические поражения и их последствия». – Москва. – 31окт-3ноябр 2017г.– С. 119-120
- 30A. Мартусевич А.К., Богомолова Е.Б., Краснова С.Ю., Янин Д.В., Галка А.Г. Перспективы применения ближнепольного СВЧ-зондирования кожи для оценки ее состояния в комбустиологии // Тез. Первого съезда хирургов ДФО и научно-практ. конф., посвящ. 145-летию Военно-морского клинического госпиталя Тихоокеанского морского флота. – Владивосток. – 13-15 сентября 2017 г. - С. 197-198
- 31A. D.V. Yanin, A.G. Galka, A.V. Kostrov, V.E. Zagainov and S.A. Vasenin. Investigation of electrodynamic parameters of biological tissues // 3rd International Conference «Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications»(TERA-2018), EPJ Web Conf., 195 (2018) 08007
- 32A. 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, 27-29ноября 2017г.)–ИРЗ РАН, с. 217-221
- 33A. 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

34A. Andrew K. Martusevich, A.G. Galka, S.Yu. Krasnova, S.V. Petrov and A.V. Novikov. 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

35A. Галка А.Г., Янин Д. В., Смирнов А. И., Костров А. В., Стриковский А. В. Резонансная ближнепольная СВЧ-диагностика плазмы и других материальных сред. Тезисы доклада IX конференции "Современные методы диагностики плазмы и их применение", Москва, 5-7 ноября 2014г. С. 78-81

36A. 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

37A. 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 2014г. С.503-508

38A. 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

39A. 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

40A. Andrew K. Martusevich, A.G. Galka, S.Yu. Krasnova, D.V. Yanin and A.V. Kostrov. 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) 08004

Глава 1 ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЗОНАНСНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ БЛИЖНЕПОЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕД

Электродинамические параметры среды а также характеристики их пространственного распределения представляют важнейшую информацию об исследуемом объекте и позволяют судить о структуре, состоянии и возможных изменениях внутри предмета.

Измерение комплексной диэлектрической проницаемости невозможно без адекватной электродинамической модели, учитывающей как специфику исследуемого объекта, так и конструктивные особенности измерительной системы, неотъемлемыми частями которой являются резонатор и антенна. Метод расчета измерительной системы зависит от типа резонатора и ближнеполюной антенны.

Аналитическое описание взаимодействия электромагнитных полей с веществом является трудоемкой задачей. Одним из вариантов упрощенного описания является метод численного расчета конфигурации электромагнитного поля с помощью специализированных компьютерных приложений либо оригинальных авторских алгоритмов. Данные методы, преимущественно используемые для моделирования объемных резонаторов, обладают рядом важных преимуществ. Во-первых, они являются универсальными и позволяют рассчитывать характеристики СВЧ структур практически любой сложности и конфигурации. Однако такой подход обладает существенным недостатком, связанным с высокими вычислительными затратами, определяемыми сложностью моделируемой структуры и требованиям к точности. К тому же, он не позволяет получать выражения, описывающие рассматриваемую структуру в аналитическом виде.

Нередко применяется волновой подход к моделированию работы СВЧ структуры, основанный на поиске собственных частот резонатора, но не учитывающий систему возбуждения и приема сигналов. Несостоятельность данного подхода очевидна, поскольку, добротность распределенного колебательного контура в дециметровом диапазоне длин волн зависит от связи резонатора с генераторной и приемной линиями.

Иногда достаточно знать лишь ряд эквивалентных параметров резонатора, не прибегая к детализации полевой картины колебаний в них. В этом случае резонатор для данного типа колебаний приближенно можно представить в виде эквивалентной схемы с индуктивностью, емкостью и сопротивлением потерь контура.

Использование длинных линий с распределенными параметрами в качестве резонатора и зондирующих антенн позволяет ограничиться анализом поля по одной координате вдоль линии. Анализ резонансных явлений в таких системах сводится к решению телеграфных уравнений для тока и напряжения с внешними источниками. В случае линейных систем, возбуждаемых элементами связи малых размеров, источники можно считать точечными. Тогда задача сводится к разложению искомого решения по собственным функциям измерительной системы с соответствующими граничными условиями.

Наиболее распространенным методом расчета электродинамической модели распределенных колебательных систем является «импедансный» подход, суть которого заключается в вычислении коэффициента отражения сигнала от измерительной системы. Данный коэффициент зависит как от электродинамических свойств исследуемого объекта, так и от его размеров. Таким образом, чтобы представить поведение отклика резонаторного измерителя на помещение в него исследуемого образца, необходимо проанализировать амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики измерительной системы, или решая обратную задачу, поведение резонансной частоты и добротности.

Данный подход наиболее удобен в СВЧ диапазоне для распределенных колебательных систем. Используемый для повышения чувствительности измерительной системы резонатор в этом случае можно рассматривать как отрезок длинной линии с известными погонными параметрами. Зондирование среды можно осуществлять несколькими способами. Слабопроводящие объекты, или среды с диэлектрической проницаемостью, мало отличающейся от единицы, как например слабостолкновительная плазма, газы, исследуются путем погружения резонатора в среду. Сильно проводящие объекты, как например биологические ткани, водосодержащие предметы, взаимодействуют с полем резонатора путем «неполного подключения» нагрузки в резонатор. Суть «неполного подключения» заключается в уменьшении доли энергии, рассеиваемую в исследуемой среде, по отношению к энергии, накопленной в резонаторе. На практике «неполное подключение» можно осуществлять либо перемещая объект в область меньшего электрического поля, либо шунтируя измерительную емкость параллельной ей индуктивностью.

В данной главе развита электродинамическая модель резонансной измерительной системы, основными элементами которой служат резонатор с ближнепольной зондирующей антенной. Связь резонатора с линиями возбуждения и приема сигнала осуществляется магнитными петлями связи у закороченного конца. Применительно к

диагностике разреженных сред ближнеполюсная антенна отсутствует, а зондирование среды осуществляется квазистатическим электрическим полем 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, возбуждающей линиях связи и в закороченном конце резонатора, позволяющие связать резонансный 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.

Для конкретных конструкций зонда, 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 собственной частотой и амплитудой принимаемого сигнала. В частности, рассмотрены следующие виды измерительных систем: резонатор на отрезке двухпроводной линии для измерения концентрации плазмы и резонатор на полуволновом отрезке коаксиальной линии для диагностики давления газа (**раздел 1.1.1**). Для подповерхностной диагностики неоднородных сред в **разделе 1.1.2** рассчитан резонатор, измерительная часть 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 ближнеполюсной 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.

1.1 Импедансный метод расчета электродинамической модели резонансной измерительной системы

Резонансная измерительная система состоит из следующих элементов (рис 1.1): 1 - возбуждающая линия из экранированного кабеля, передающая высокочастотный сигнал от генератора G к резонатору через магнитную петлю связи; 2 - распределенный колебательный контур, состоящий из отрезка длинной линии с волновым сопротивлением ρ_0 ; 3 - приемная линия, аналогичная 1, передающая отклик измерительной системы на детектирующее устройство. Для эффективного возбуждения сигнала и приема его отклика один конец резонатора закорочен магнитной петлей связи. Другой конец резонатора подключен к измерительной части с комплексным импедансом Z .

Такое представление измерительной системы отвечает наиболее общему случаю взаимодействия электромагнитного поля резонатора с исследуемым объектом. В случае слабопроводящих разреженных сред (газы, плазма) с диэлектрической проницаемостью ε можно считать, что резонатор целиком погружен в среду, тогда волновое сопротивление $\rho_0^\varepsilon = \rho_0 / \sqrt{\varepsilon}$ зависит от ε . При этом в зависимости от типа резонатора импеданс Z принимает определенное значение: $Z=0$ для полуволнового резонатора с короткозамкнутыми концами, либо $Z=\infty$ для четвертьволнового резонатора, один конец которого разомкнут, а другой замкнут магнитной петлей связи. В случае неразрушающей подповерхностной диагностики резонатор с постоянным волновым сопротивлением $\rho_0 = const$ используется в качестве согласующего трансформатора, а зондирование диэлектрических и проводящих свойств объекта осуществляется электрическим полем малогабаритной антенны с входным импедансом Z .

Во избежание отраженной волны в приемном тракте активное сопротивление детектирующего устройства R на практике совпадает с волновым сопротивлением соединительной линии ρ , поэтому регистрируемый ток равен току в приемной петле. Собственная индуктивность петель магнитной связи L , коэффициент взаимоиндукции между линиями возбуждения и приема сигнала с резонатором равен M . Связью между линиями 1 и 3 пренебрегаем.

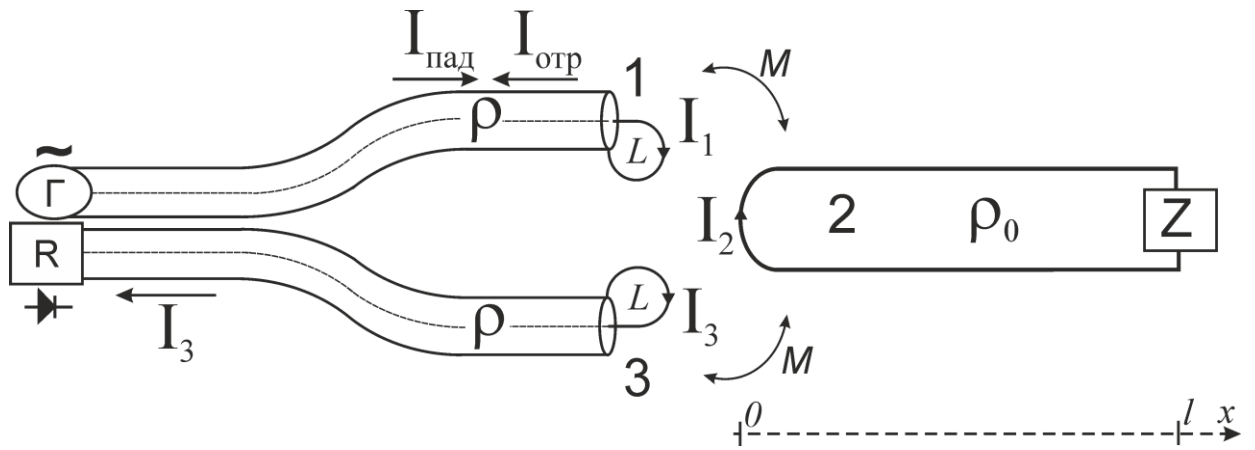


Рис. 1.1 Электродинамическая схема измерительной системы.

1 – возбуждающая петля, 2 – резонатор, 3 – приемная петля, Γ – 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.

Теоретическое описание датчика основано на нахождении уравнений для комплексных амплитуд токов в передающей и приемной линиях и в резонаторе. В соответствии с [13] амплитуда тока в возбуждающей петле равна:

$$I_1 = I_{\text{пад}} \cdot (1 - G), \quad (1.1)$$

где $I_{\text{пад}}$ – амплитуда отраженной волны, G – комплексный коэффициент отражения волны тока.

Сосредоточенный контур, эквивалентный распределенной колебательной системе 2 (рис. 1.1), получается путем пересчета измерительного импеданса Z по длинной линии с волновым сопротивлением ρ_0 , образующей резонатор, к закороченному концу $x = 0$:

$$Z_2 = \rho_0 \cdot \frac{Z + j \cdot \rho_0 \cdot \text{tg}(kl)}{\rho_0 + j \cdot Z \cdot \text{tg}(kl)}, \quad (1.2)$$

где l – длина резонатора, $k = \omega \cdot \sqrt{L_n \cdot C_n}$ – коэффициент фазы в длинной линии, образующей резонатор, ω – круговая частота генератора, L_n, C_n – погонные индуктивность и емкость длинной линии. Эквивалентная схема приемного контура образована последовательным соединением сопротивления индуктивности $j \cdot \omega \cdot L$ и $R_{\text{экв}}$ –

пересчитанного в соответствии с (1.2) сопротивления R к петле 3 по длинной линии с волновым сопротивлением ρ . При $R = \rho$, получим $R_{\text{экв}} = R$.

Эквивалентная схема с магнитной связью изображена на рис. 1.2.

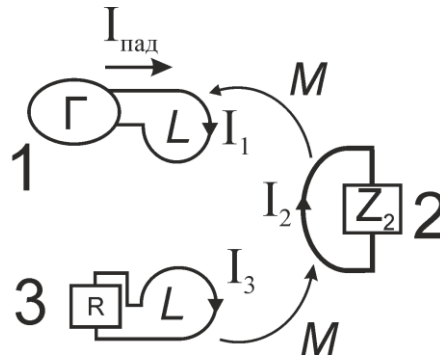


Рис. 1.2 Эквивалентная схема измерительной системы с сосредоточенными параметрами. Связь резонатора с возбуждающей и приемной линиями осуществляется посредством трансформаторной связи.

Для нахождения контура с сосредоточенными параметрами, эквивалентного измерительной системе, воспользуемся формулой пересчета импедансов через магнитную связь. В общем случае пересчет комплексного импеданса из контура b в контур a (рис. 1.3) через трансформаторную связь осуществляется по формуле [14]:

$$Z_b^{\text{экв}} = -\frac{Z_M^2}{j \cdot \omega \cdot L_b + Z_b}, \quad (1.3)$$

где $Z_M = j \cdot \omega \cdot M$ - импеданс взаимоиндукции.

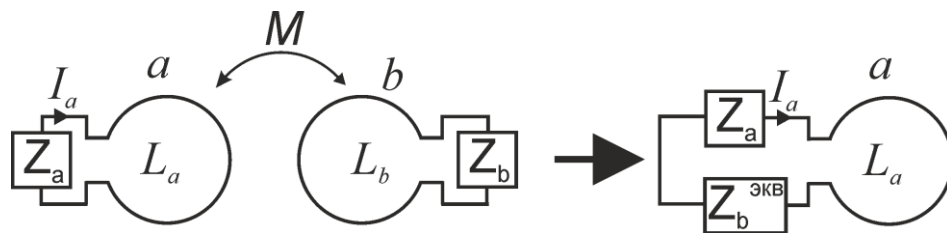


Рис. 1.3. Иллюстрация эквивалентного преобразования импеданса Z_b через магнитную связь из контура b в контур a .

Пересчитаем по формуле (1.3) сопротивление R из приемной линии в колебательный контур через трансформаторную связь приемной рамки с резонатором (рис. 1.4, переход 1):

$$R^{\text{экв}} = -\frac{Z_M^2}{j \cdot \omega \cdot L + R} \quad (1.4)$$

Затем, последовательно соединенные сопротивления $R^{эKB}$ и Z_2 из резонансного контура пересчитаем в эквивалентное входное сопротивление $Z_{вх}$ в возбуждающем тракте (рис. 1.4, переход 2). После соответствующих подстановок получим выражение для $Z_{вх}$:

$$Z_{вх} = j \cdot \omega \cdot L - \frac{Z_M^2}{Z_2 - \frac{Z_M^2}{j \cdot \omega \cdot L + R}} \quad (1.5)$$

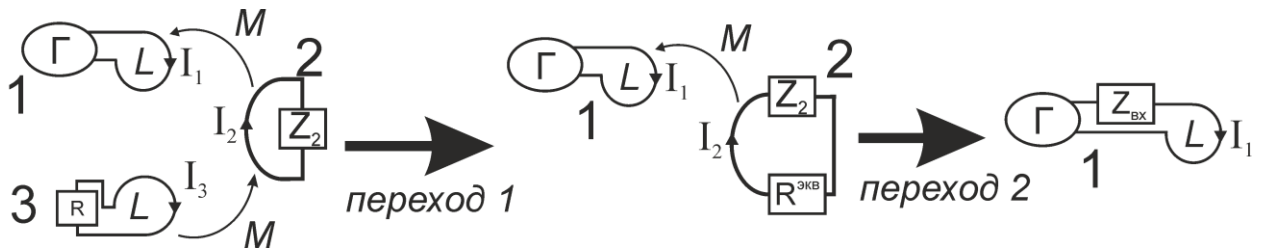


Рис. 1.4 Иллюстрация перехода от колебательного контура, связанного с линиями приема и возбуждения через магнитные петли, к эквивалентной сосредоточенной схеме без связей. Переход 1 соответствует пересчету сопротивления R из приемного тракта в резонатор через магнитную связь. Переход 2 соответствует пересчету суммарного сопротивления ($R^{эKB} + Z_2$) из резонатора в тракт возбуждения.

В соответствии с [13] коэффициент отражения G можно выразить через входной импеданс $Z_{вх}$ и волновое сопротивление коаксиальной линии ρ :

$$G = \frac{Z_{вх} - \rho}{Z_{вх} + \rho} \quad (1.6)$$

Подставляя (1.8) в (1.9) с учетом (1.4) получим ток в возбуждающей петле связи:

$$I_1 = \frac{2 \cdot I_{над}}{1 + j \cdot \frac{\omega L}{\rho} - \frac{Z_M^2}{\rho \cdot Z_2 - \frac{\rho \cdot Z_M^2}{Z_3}}} \quad (1.7)$$

где $Z_3 = j \cdot \omega L + R$ - полный комплексный импеданс приемного контура. Для нахождения комплексных амплитуд токов I_2, I_3 в отсутствие источников запишем уравнения Кирхгофа для замкнутых контуров 2 и 3, соответственно (рис. 1.2):

$$\begin{cases} I_1 \cdot Z_M + I_2 \cdot Z_2 + I_3 \cdot Z_M = 0 \\ I_2 \cdot Z_M + I_3 \cdot Z_3 = 0 \end{cases}, \quad (1.8)$$

где $I_1 \cdot Z_M$, $I_3 \cdot Z_M$ - наводимые в резонаторе ЭДС взаимной индукции токами I_1 и I_3 , соответственно, а $I_2 \cdot Z_M$ - ЭДС, наводимая током I_2 в приемной петле связи. Выражая из (1.8) токи I_2, I_3 через I_1 получим:

$$I_2 = -\frac{Z_M}{Z_2 - \frac{Z_M^2}{Z_3}} \cdot I_1$$

$$I_3 = \frac{Z_M^2}{Z_2 \cdot Z_3 - Z_M^2} \cdot I_1$$
(1.9)

Подставляя (1.7) в (1.9), после преобразований получим ток в резонаторе I_2 и ток в приемной линии I_3 :

$$I_2 = -\frac{Z_M}{Z_2 - \frac{Z_M^2}{Z_3}} \cdot \frac{I_{nad}}{j \cdot \frac{\omega L}{\rho} + 1 - \frac{Z_M^2 \cdot Z_3}{\rho \cdot Z_2 \cdot Z_3 - \rho \cdot Z_M^2}}$$

$$I_3 = \frac{Z_M^2}{Z_2 \cdot Z_3 - Z_M^2} \cdot \frac{I_{nad}}{j \cdot \frac{\omega L}{\rho} + 1 - \frac{Z_M^2 \cdot Z_3}{\rho \cdot Z_2 \cdot Z_3 - \rho \cdot Z_M^2}}$$
(1.10)

Из (1.10) следует, что выходной ток I_3 зависит не только от параметров резонатора и импеданса зондирующей антенны, но и от параметров измерительной аппаратуры: сопротивления детектора, коэффициента взаимной индукции, волнового сопротивления подводящих кабелей. Поэтому для точного описания датчика необходимо рассматривать резонатор в совокупности с линиями возбуждения и приема сигнала.

Ценность получившихся выражений (1.7) и (1.10) заключается в их универсальном характере при построении электродинамической модели распределенного колебательного контура на отрезке длинной линии с волновым сопротивлением ρ_0 . Основным преимуществом этих формул является возможность моделировать изменения электродинамических свойств исследуемых объектов в широком диапазоне значений диэлектрической проницаемости и проводимости. Однако, данные уравнения довольно громоздки и дальнейший анализ их в общем виде лишен наглядности. Для практической работы по расчету измерительной системы целесообразно использовать ресурсы ЭВМ.

Стоит отметить, что индуктивное сопротивление петель связи мало по сравнению с волновым сопротивлением кабеля $\omega \cdot L \ll \rho$. Тогда из (1.7) и (1.10) получим выражения для искомых токов:

$$I_1 = \frac{2 \cdot I_{nad}}{1 + \frac{Z_M^2}{Z_M^2 - \rho \cdot Z_2}}$$

$$I_2 = -\frac{2 \cdot Z_M \cdot I_{nad}}{Z_2 - 2 \cdot \frac{Z_M^2}{\rho}}, \quad (1.11)$$

$$I_3 = \frac{I_{nad}}{\frac{Z_2 \cdot \rho}{2 \cdot Z_M^2} - 1}$$

где $Z_2 = \rho_0 \cdot \frac{Z + j \cdot \rho_0 \cdot tg(kl)}{\rho_0 + j \cdot Z \cdot tg(kl)}$ является функцией измерительного импеданса Z .

1.1.1 Четвертьволновый и полуволновый резонаторы для диагностики малых вариаций диэлектрической проницаемости

Рассмотрим в качестве примера резонатор на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии в однородной среде с диэлектрической проницаемостью ε , конец которого в точке $x=l$ разомкнут (рис. 1.1), что соответствует условию $Z = \infty$ и поэтому $Z_2 = -j \cdot \frac{\rho_0}{\sqrt{\varepsilon}} \cdot ctg(kl)$, где ρ_0 - волновое сопротивление резонатора в вакууме. Данный тип резонатора наиболее распространен для диагностики однородных диэлектрических сред и будет использован для определения концентрации плазмы и давления газа во второй главе диссертации. Длина $l = \lambda_0 / 4$ соответствует четверти длины волны в вакууме. Такой резонатор используется для измерений электронной концентрации плазмы. Подставляя Z_2 и Z_M в (1.11), получим выражение для нормированной комплексной амплитуды тока

$$H = \frac{I_3}{I_{nad}}:$$

$$H = \frac{-1}{1 - \frac{j \cdot ctg(kl)}{2\sqrt{\varepsilon}} \cdot \frac{\rho_0 \rho}{M^2 \omega^2}} \quad (1.12)$$

Преобразуем фазу kl : $kl = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda_0}{4} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \sqrt{\varepsilon}$, где ω_0 - собственная частота резонатора в вакууме. При малых сдвигах резонансной частоты

$\Delta\omega = \omega - \omega_0$, $\delta = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$, $|\delta| \ll 1$ и малых изменениях диэлектрической проницаемости

$\Delta\varepsilon = \varepsilon - 1, |\Delta\varepsilon| \ll 1$ разложим функцию H в асимптотический ряд по малому параметру $\alpha = \min(\delta, \Delta\varepsilon)$. В первом порядке малости по α получим:

$$H = \frac{-1}{1 + 2j \cdot (\delta + \Delta\varepsilon / 2) \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{\rho_0 \rho}{M^2 \omega_0^2}}, \quad (1.13)$$

откуда следует формула для квадрата нормированной амплитуды тока в приемной петле $|H|^2$, пропорциональной мощности принимаемого сигнала:

$$|H|^2 = \frac{1}{1 + 4 \cdot \left(\frac{\pi}{8} \cdot \frac{\rho_0 \rho}{M^2 \omega_0^2} \right)^2 \cdot (\delta + \Delta\varepsilon / 2)^2}, \quad (1.14)$$

Ширина кривой $|H|^2(\delta)$ по уровню 0.5 определяется добротностью измерительной системы $Q_{\lambda/4} = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{\rho_0 \rho}{M^2 \omega_0^2}$, определяемая малым параметром связи резонатора с линиями

возбуждения и приема сигнала $\chi = \frac{\omega_0^2 M^2}{\rho_0 \rho} \ll 1$.

Полуволновый резонатор, закороченный на обоих концах, имеет вдвое большую длину, нежели четвертьволновый на той же резонансной частоте, однако в силу конструктивных особенностей полуволновый резонатор более устойчив к механическим колебаниям, что существенно при исследовании нестационарных процессов в среды, связанных, например, с флуктуациями плотности газа. Для такого типа резонатора $Z = 0$ (рис. 1.1), $Z_2 = j \cdot \frac{\rho_0}{\sqrt{\varepsilon}} \cdot \operatorname{tg}(kl)$ и выражение для нормированного тока в приемной петле имеет вид, аналогичный (14):

$$|H|^2 = \frac{1}{1 + 4Q^2 \cdot (\delta + \Delta\varepsilon / 2)^2}, \quad (1.15)$$

где $Q_{\lambda/2} = \frac{\pi}{4} \frac{\rho_0 \rho}{M^2 \omega_0^2}$ - добротность полуволнового резонатора.

1.1.2 Резонатор с ближнепольной антенной в виде отрезка двухпроводной линии

Рассмотрим в качестве другого примера модель четвертьволнового резонатора с зондирующим элементом в виде отрезка двухпроводной линии. Такой тип ближнепольной

антенны наиболее прост для аналитического описания при зондировании неоднородных сред и будет использован для подповерхностной диагностики проводящих сред в 4 главе диссертации. В этом случае погонные параметры постоянны, а нагрузкой Z служит емкостной импеданс измерительной части (рис. 1.5).

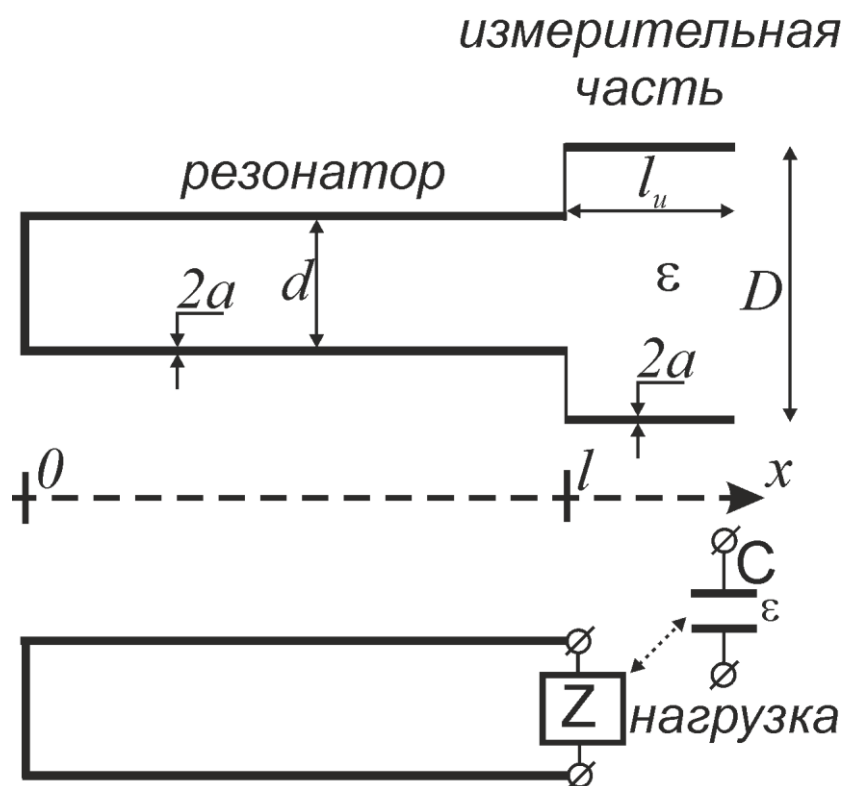


Рис. 1.5 Схема измерительной системы: а) резонатор с измерительной частью в виде двух параллельных проводов б) эквивалентная схема резонатора с нагрузкой Z в виде емкости отрезка двухпроводной линии

Для этого представим измерительную часть датчика в виде емкости отрезка двухпроводной линии в вакууме длиной l_u с расстоянием между проводами D и радиусом проводов a (рис. 1.5). Импеданс открытого конца двухпроводной линии в точке $x=l$ равен [14]:

$$Z = -j \cdot \frac{\rho_u}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\epsilon} \cdot l_u \right), \quad (1.16)$$

где ϵ - диэлектрическая проницаемость среды около измерительных проводов, ρ_u - волновое сопротивление двухпроводной линии:

$$\rho_u = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \ln \frac{D}{a} \quad (1.17)$$

При малой длине измерительной части по сравнению с вакуумной длиной волны

$l_u \ll \frac{c}{\omega}$ импеданс (1.16) имеет простой вид:

$$Z = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot C}, \quad (1.18)$$

где $C = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot l_u}{\ln \frac{D}{a}}$ - емкость двухпроводной линии в вакууме.

Адмитанс измерительной части $Y = \frac{1}{Z}$ представим как сумму адмитанса ненагруженного резонатора Y_0 с диэлектрической проницаемостью измерительной части равной и малую поправку к Y_0 , появляющуюся при контакте датчика со средой:

$$Y = Y_0 + Y_1 \quad (1.19)$$

где $Y_1 \cdot \rho_0 \ll 1$. Y_0 соответствует собственной частоте ненагруженного резонатора ω_0 (в отсутствие контакта датчика со средой), а поправка Y_1 приводит к малому сдвигу резонансной частоты $\omega = \omega_0 \cdot (1 + \delta)$, $\delta \ll 1$. Подставляя $Z = \frac{1}{Y}$ в формулу пересчета импедансов (1.5), в нулевом порядке малости по параметру $\alpha = \min(\delta, Y_1 \cdot \rho_0)$ получим уравнение для тока в приемной петле резонатора в отсутствие контакта датчика со средой:

$$I_3 = \frac{-I_{над}}{1 + \frac{\rho_0 \cdot \rho}{2 \cdot M^2 \cdot \omega_0^2} \frac{1 + j \cdot \rho_0 \cdot Y_0 \cdot tg(k_0 l)}{\rho_0 \cdot Y_0 + j \cdot tg(k_0 l)}}, \quad (1.20)$$

где $k_0 = \frac{\omega_0}{V}$ - волновое число для распространяющейся со скоростью V с частотой ω_0 вдоль резонатора электромагнитной волны. Для резонатора на отрезке двухпроводной линии в вакууме $V = c$. Резонансную частоту ω_0 найдем из условия максимальной амплитуда выходного сигнала: $|I_3| \rightarrow \max$, которое выполняется при равенстве нулю второго слагаемого в знаменателе (20):

$$1 + j \cdot \rho_0 \cdot Y_0 \cdot tg(k_0 l) = 0 \quad (1.21)$$

Обозначая электрическую длину резонатора $\theta = k_0 l$ и подставляя $Y_0 = j \cdot \omega \cdot C$ в (1.20), получим трансцендентное уравнение для $\theta = \frac{\omega_0}{c} l$:

$$\theta \cdot \beta = ctg(\theta) \quad (1.22)$$

где $\beta = \frac{C}{C_\Sigma}$, C - емкость двухпроводной линии измерительной части в вакууме, $C_\Sigma = l \cdot C_n$ -

эквивалентная емкость отрезка двухпроводной линии, образующей резонатор, длиной l .

В первом порядке малости по параметру α получим:

$$I_3 = \frac{-I_{nad}}{1 + \frac{\rho}{2 \cdot M^2 \cdot \omega_0^2 \cdot Y_0} \cdot (-tg(k_0 l) \cdot k_0 \cdot l \cdot \delta + j \cdot \rho_0 \cdot Y_0 \cdot k_0 \cdot l \cdot \delta + j \cdot \rho_0 \cdot Y_1 \cdot tg(k_0 l))}, \quad (1.23)$$

Выделяя действительную и мнимую часть знаменателя (19), преобразуем данное выражение к виду:

$$I_3 = \frac{-I_{nad}}{1 + \frac{\rho}{2 \cdot M^2 \cdot \omega_0^2 \cdot Y_0} \cdot (-\delta \cdot k_0 l \cdot (ctg(k_0 l) + tg(k_0 l)) - \rho_0 \cdot \text{Im} Y_1 \cdot tg(k_0 l)) + j \cdot \frac{\rho \rho_0 \cdot tg(k_0 l)}{2 \cdot M^2 \cdot \omega_0^2 \cdot Y_0} \cdot \text{Re} Y_1}$$

или

$$I_3 = \frac{-I_{nad}}{1 + \frac{\rho \cdot \rho_0 \cdot tg(k_0 l)}{2 \cdot M^2 \cdot \omega_0^2 \cdot Y_0} \cdot (-\delta / \rho_0 \cdot k_0 l / \sin^2(k_0 l) - \text{Im} Y_1) + j \cdot \frac{\rho \cdot \rho_0 \cdot tg(k_0 l)}{2 \cdot M^2 \cdot \omega_0^2 \cdot Y_0} \cdot \text{Re} Y_1}$$

или

$$I_3 = \frac{-I_{nad}}{1 + 2Q \cdot \rho_0 \cdot \text{Re} Y_1 \cdot \sin^2(k_0 l) / k_0 l + j \cdot 2Q (\delta + \sin^2(k_0 l) / k_0 l \cdot \rho_0 \cdot \text{Im} Y_1)}, \quad (1.24)$$

где $Q = \frac{\rho \cdot \rho_0 \cdot k_0 l}{4 \cdot M^2 \cdot \omega_0^2}$ - добротность измерительной системы.

Из (1.24) видно, что поправка Y_1 к адмитансу измерительной емкости определяет относительный сдвиг резонансной частоты датчика δ и амплитуду тока выходного сигнала $\max(|I_3|)$ на резонансной частоте:

$$\delta = -\text{Im} Y_1 \rho_0 \cdot \frac{\sin^2(k_0 l)}{k_0 l} \quad (1.25)$$

$$\max(|I_3|) = \frac{I_{nad}}{\sqrt{1 + (2Q \cdot \rho_0 \cdot \text{Re} Y_1)^2}} \quad (1.26)$$

При отсутствии потерь в исследуемой среде $\text{Re} Y_1 = 0$ амплитуда тока на резонансе совпадает с амплитудой тока зондирующей волны $\max(|I_3|) = I_{nad}$.

Адмитанс Y_1 связан с диэлектрической проницаемостью ε равенством:

$$Y_x^1 = j \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\rho} \cdot \tan(\sqrt{\varepsilon} \cdot k_0 l) - \frac{j}{\rho} \cdot \tan(k_0 l) \quad (1.27)$$

Выражения (1.25)-(1.27) образуют полную систему уравнений для нахождения ε по сдвигу резонансной частоты и изменению амплитуды датчика.

1.1.3 Полуволновый резонатор с неполным подключением для диагностики проводящих сред

Подключение зондирующей емкости последовательно распределенному колебательному контуру оправдано только при зондировании слабопроводящих сред. При зондировании такой емкостью сильнопроводящих объектов резонансные свойства измерительной системы резко ухудшаются из-за больших потерь энергии в исследуемом объекте, и как следствие, чувствительность датчика уменьшается. С целью сохранения чувствительности измерительной системы при зондировании проводящих объектов используют так называемое «неполное» подключение нагрузки Z в резонатор. Рассмотрим полуволновый резонатор в виде отрезка коаксиальной линии с фторопластовым заполнением на одном конце которого находится магнитная рамка с индуктивностью L для связи резонатора с возбуждающей и приемной линиями, а на другом конце – нагрузка Z , включающая зондирующую ближнепольную антенну в виде емкости C и параллельно ей подключенную индуктивность L_x (рис. 1.6):

$$Z = \left(\frac{1}{j \cdot \omega \cdot L_x} + j \cdot \omega \cdot C \right)^{-1}, \quad (1.28)$$

где емкость измерительной части зависит от измеряемой диэлектрической проницаемости $C = C(\varepsilon)$. Подключение индуктивности L_x уменьшает потери энергии, вносимые в резонатор. Такой тип резонансной измерительной системы будет рассмотрен в главе 3 для диагностики биологических тканей.

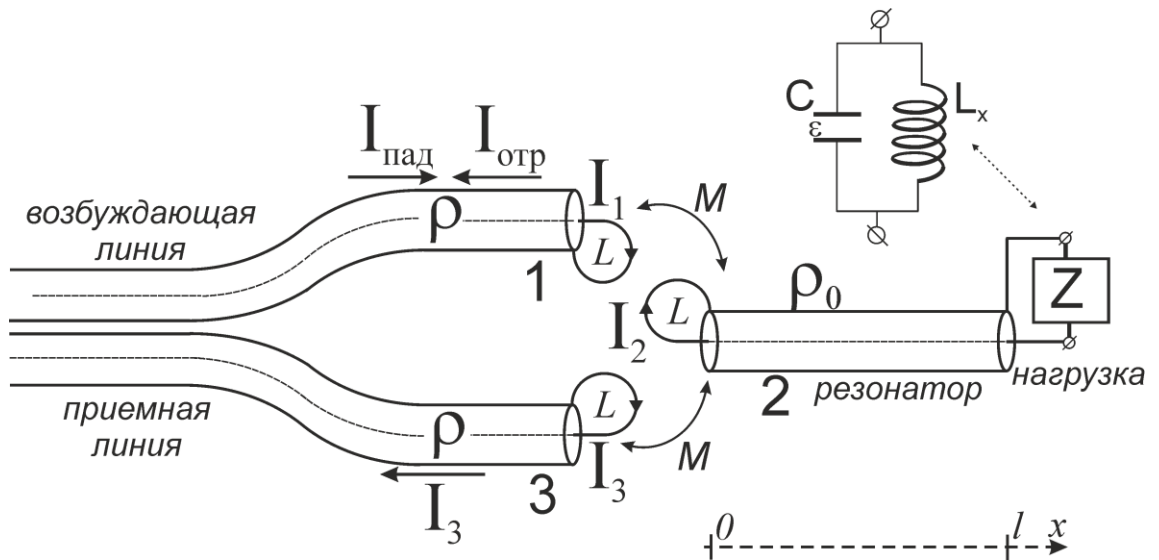


Рис. 1.6 Схема резонансной измерительной системы с «неполным» подключением нагрузки Z для диагностики проводящих сред. Нагрузка Z представлена в виде зондирующей емкости C и параллельно ей подключенной индуктивности L_x

Метод нахождения отклика измерительной системы аналогичен предыдущему случаю, только теперь наличие среды вблизи антенны приводит к малому изменению нагрузки: $Z = Z^0 + Z^1$, где $Z^0 = Z(\varepsilon = 1)$ - импеданс нагрузки в отсутствие контакта датчика со средой, а Z^1 - малая добавка к импедансу, появляющаяся при наличии среды.

При подстановке в выражение для тока в приемной петле измерительного импеданса, пересчитанного по длине резонатора l по формуле (1.5), необходимо учесть дополнительный индуктивный импеданс $j \cdot \omega \cdot L$, связанный с магнитной петлей связи на конце резонатора $x = 0$:

$$Z_2 = j \cdot \omega \cdot L + \rho_0 \cdot \frac{Z + j \cdot \rho_0 \cdot \operatorname{tg}(kl)}{\rho_0 + j \cdot Z \cdot \operatorname{tg}(kl)} \quad (1.29)$$

В нулевом порядке малости по параметру $\alpha = \min(\delta, Z_1 / \rho_0)$ получим уравнение для тока в приемной петле резонатора в отсутствие контакта датчика со средой:

$$I_3 = \frac{-I_{\text{пад}}}{1 + j \frac{\rho \cdot \omega_0 \cdot L}{2 \cdot (M \cdot \omega_0)^2} + \frac{\rho \cdot \rho_0}{2 \cdot (M \cdot \omega_0)^2} \frac{Z_0 / \rho_0 + j \cdot \operatorname{tg}(k_0 l)}{1 + j \cdot Z_0 / \rho_0 \cdot \operatorname{tg}(k_0 l)}}, \quad (1.30)$$

откуда нетрудно получить уравнение для нахождения частоты ω_0

$$j \frac{\omega_0 \cdot L}{\rho_0} + \frac{Z_0 / \rho_0 + j \cdot \operatorname{tg}(k_0 l)}{1 + j \cdot Z_0 / \rho_0 \cdot \operatorname{tg}(k_0 l)} = 0 \quad (1.31)$$

В первом порядке малости по параметру α получим:

$$I_3 = \frac{-I_{na\delta}}{1 + j \frac{\rho \cdot \omega_0 \cdot L}{2 \cdot (M \cdot \omega_0)^2} \delta + \frac{\rho \cdot \rho_0}{2 \cdot (M \cdot \omega_0)^2} \left(\left(\frac{\omega_0 \cdot L}{\rho_0} \right)^2 + 1 \right) j k_0 l \delta + \frac{Z_1 \cdot (\omega_0 \cdot L / \rho_0 \cdot \operatorname{tg}(k_0 l) + 1)}{1 + j \cdot Z_0 / \rho_0 \cdot \operatorname{tg}(k_0 l)}}} \quad (1.32)$$

Выделяя действительную и мнимую часть в знаменателе, получим относительный сдвиг резонансной частоты датчика δ и амплитуду тока выходного сигнала $\max(|I_3|)$ на резонансной частоте, зависящие от параметров зондирующей антенны:

$$I_3 = \frac{-I_{na\delta}}{1 + j \frac{\rho \cdot \omega_0 \cdot L}{2 \cdot (M \cdot \omega_0)^2} \delta + \frac{\rho \cdot \rho_0}{2 \cdot (M \cdot \omega_0)^2} \left(\left(\frac{\omega_0 \cdot L}{\rho_0} \right)^2 + 1 \right) j k_0 l \delta + \frac{Z_1 \cdot (\omega_0 \cdot L / \rho_0 \cdot \operatorname{tg}(k_0 l) + 1)}{1 + j \cdot Z_0 / \rho_0 \cdot \operatorname{tg}(k_0 l)}}} \quad (1.33)$$

$$\delta = - \frac{\operatorname{Im} \left(\frac{Z_1 \cdot (\omega_0 \cdot L / \rho_0 \cdot \operatorname{tg}(k_0 l) + 1)}{1 + j \cdot Z_0 / \rho_0 \cdot \operatorname{tg}(k_0 l)} \right)}{L \cdot \omega_0 + \rho_0 \left(\left(\frac{\omega_0 \cdot L}{\rho_0} \right)^2 + 1 \right) j k_0 l} \quad (1.34)$$

$$\max(|I_3|) = \frac{I_{na\delta}}{1 + \frac{\rho \rho_0}{2(M \omega_0)^2} \cdot \operatorname{Re} \left(\frac{Z_1 \cdot (\omega_0 \cdot L / \rho_0 \cdot \operatorname{tg}(k_0 l) + 1)}{1 + j \cdot Z_0 / \rho_0 \cdot \operatorname{tg}(k_0 l)} \right)} \quad (1.35)$$

1.2 Электродинамическая модель измерительной системы, рассчитанная с помощью теории возмущений для системы телеграфных уравнений

Для подтверждения правильности развитой электродинамической модели на основе импедансного подхода применим альтернативный метод расчета отклика измерительной системы, основанный на решении системы телеграфных уравнений в приближении малости вносимого в резонатор возмущения средой с диэлектрической проницаемостью ε [15].

Для нахождения связи между амплитудой выходного сигнала U_{out} в измерительной схеме и ε рассмотрим систему телеграфных уравнений, описывающих комплексные амплитуды тока и напряжения в резонаторе СВЧ-зонда (рис 1.7):

$$\frac{dU}{dz} = -j \cdot \omega \cdot L \cdot I + E \cdot \delta(z+0), \quad (1.36)$$

$$\frac{dI}{dz} = -j \cdot \omega \cdot C \cdot U \quad (1.37)$$

с граничными условиями

$$I(l) = 0, \quad U(0) = 0. \quad (1.38)$$

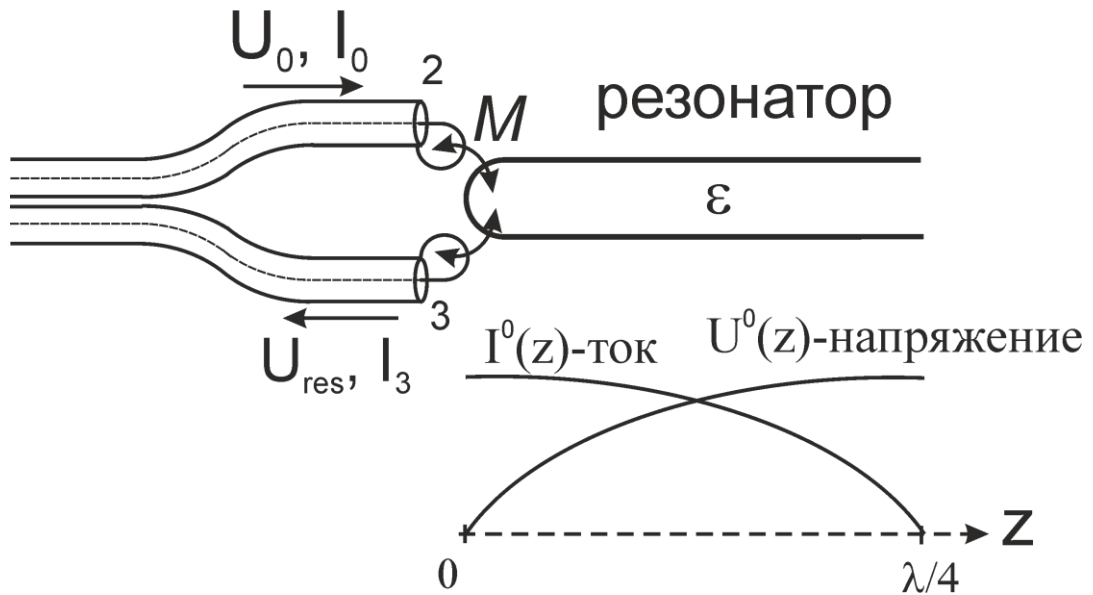


Рис. 1.7 Схема резонатора с магнитными петлями связи, иллюстрирующая метод расчета измерительной системы с помощью теории малых приближений для нахождения тока и напряжения в резонаторе, помещенной в среду с диэлектрической проницаемостью ε .

В выражениях (1.36) – (1.37) введены следующие обозначения: L и C – погонная индуктивность и емкость передающей линии, образующей резонатор; $1/\sqrt{LC} = c$, c – скорость распространения электромагнитной волны в передающей линии, $\sqrt{L/C} = \rho$, ρ – волновое сопротивление линии, образующей резонатор; $E = -i\omega M(I_2 + I_3)$ – сосредоточенная вблизи $z = 0$ ЭДС взаимной индукции; M – коэффициент взаимной индукции между петлями связи и резонатором; I_2 и I_3 – комплексные амплитуды токов, соответственно, в передающей и приемной петлях связи.

Индуктивное сопротивление петель связи ωL_c мало по сравнению с волновым сопротивлением ρ_c приёмной и передающей линий ($\omega L_c \ll \rho_c$), L_c близка по величине к M , волновое сопротивление ρ порядка ρ_c . В соответствии с этим, учитывая наводимую в передающей петле связи ЭДС в виде $-i \frac{\omega M}{\rho_c} I|_{z=0}$, можно получить выражения для токов

I_2 и I_3 :

$$I_2 = 2I_0 - \frac{j\omega M}{\rho_c} \cdot I_{z=0}, \quad (1.39)$$

$$I_3 = -\frac{j\omega M}{\rho_c} \cdot I_{z=0}, \text{ и} \quad (1.40)$$

$$I_0 = iU_0 / \rho_c, \quad (1.41)$$

где I_0 и U_0 – амплитуды тока и напряжения зондирующей волны в возбуждающей линии.

При помещении резонатора в немагнитную среду с диэлектрической проницаемостью ε погонная индуктивность L не изменяется, а погонную емкость C можно представить через ε и «вакуумную» погонную емкость C_0 длинной линии, образующей резонатор: $C = \varepsilon \cdot C_0$, где $\varepsilon = 1 + \delta\varepsilon$, $\delta\varepsilon \ll 1$. На частотах ω близких к вакуумной резонансной частоте $\omega_0 = \frac{\pi c}{2l}$ ($\omega = \omega_0(1 + \delta\omega)$, $|\delta\omega| \ll 1$) решение задачи (1.36)-

(1.38) можно искать в виде асимптотического ряда по малому параметру q :

$$I = I^0 + I^1 + \dots, \quad U = U^0 + U^1 + \dots \quad (1.42)$$

где $q \sim \max \left(\delta\varepsilon, \delta\omega, \left(\frac{\omega M}{\rho} \right)^2, \left(\frac{\omega M}{\rho_c} \right)^2, \frac{I_0}{I_{z=0}} \right) \ll 1$, $I^{(i)}$, $U^{(i)}$ – члены асимптотического

разложения тока и напряжения по степеням $q^{(i)}$.

После подстановки (1.40) в (1.36) и (1.37) с учетом граничных условий (1.38) в нулевом порядке малости по q получим:

$$I^{(0)} = \bar{I} \cos\left(\frac{\pi z}{2l}\right), \quad U^{(0)} = \bar{U} \sin\left(\frac{\pi z}{2l}\right), \quad \bar{U} = -i\rho\bar{I} \quad (1.43)$$

В первом порядке малости по q для I^1 получим:

$$\frac{d^2 I^{(1)}}{dz^2} + \frac{\omega_0^2}{c^2} I^{(1)} = F(z) \quad (1.44)$$

$$F(z) = -\frac{\omega_0^2}{c^2} (\delta\varepsilon + 2\delta\omega) I^{(0)} - 2\frac{\omega_0}{c} \eta I_0 \delta(z+0) + 2j\frac{\omega_0}{c} \eta \eta_c I^{(0)} \delta(z+0)$$

и граничные условия $I^1(l) = 0$, $\frac{dI^1}{dz}(0) = 0$

где $\eta = \frac{\omega M}{\rho}$, $\eta_c = \frac{\omega M}{\rho_c}$ – малые параметры связи.

Согласно теореме Фредгольма об альтернативе, граничная задача (1.44) имеет решение при условии ортогональности правой части $F(z)$ собственному решению (1.43) однородного уравнения:

$$\int_0^l I^{(0)}(z) \cdot F(z) dz = 0 \quad (1.45)$$

После интегрирования получим ток в приемной петле:

$$I_3 = I_0 \frac{1}{1 + 2Q_0(\delta\omega + \delta\varepsilon/2)j} \quad (1.46)$$

где $Q_0 = \frac{\pi}{8\eta\eta_c}$ - добротность вакуумного резонанса, определяющего его ширину по уровню 0.5 для квадрата амплитуды тока $|I_3|^2$. Добротность Q_0 определяется связью резонатора с приемной и возбуждающей линиями. Из (1.46) следует, что при нахождении СВЧ-зонда в вакууме ($\delta\varepsilon = 0$) на частоте $\omega = \omega_0$ наблюдается согласование передающего и приемного трактов ($I_3 = I_0$), и вся мощность, подводимая к возбуждающей петле, поступает на приемную, а отраженная волна отсутствует. В этом случае, амплитуда тока в резонаторе $|\bar{I}|$ достигает максимального значения: $|\bar{I}| = \frac{I_0}{\eta_c} \gg I_0$.

Выражения (1.13) и (1.46) совпадают. Это свидетельствует об адекватности развитой модели распределенного колебательного контура на основе «импедансного» подхода.

1.3 Выводы

В данной главе диссертации развита электродинамическая модель резонансной измерительной системы, основными элементами которой служат резонатор с ближнепольной зондирующей антенной и линии возбуждения и приема сигнала с резонатора посредством магнитной связью. Применительно к разреженным средам ближнепольная антенна отсутствует, а зондирование среды осуществляется квазистатическим электрическим полем резонатора. Для расчета отклика резонатора на вносимое средой возмущение применен «импедансный» подход, в рамках которого вся измерительная система сводится к эквивалентному ей контуру с сосредоточенными параметрами. Методом пересчета импедансов по длинной линии и через магнитную связь получены общие выражения для токов в приемной и возбуждающей линиях связи и в резонаторе, 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.

Для конкретных конструкций зонда, которые будут использованы в следующих главах диссертации для развития метода резонансного ближнепольного СВЧ-

зондирования, в условиях малого сдвига резонансной частоты получены аналитические выражения, позволяющие связать диэлектрическую проницаемость и проводимость среды с собственной частотой и амплитудой сигнала. В частности, рассмотрены следующие виды измерительных систем: резонансный СВЧ-зонд на отрезке двухпроводной линии, полуволновый зонд на коаксиальном отрезке длинной линии, коаксиальный резонатор с ближнепольной антенной в виде коаксиального конденсатора и резонатор, измерительная часть которого выполнена на отрезке двухпроводной линии. 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 в приближении малого возмущения, вносимого средой в резонатор. Результаты обоих подходов совпадают.

Глава 2 АМЛИТУДНО-ФАЗОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ МАЛЫЙ ВАРИАЦИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Для исследования диэлектрических сред успешно применяются резонансные методы, чувствительные даже к малым изменениям свойств среды. При помещении резонатора в среду с диэлектрической проницаемостью ε , изменяются его резонансная частота и добротность, связанные с ε . Таким образом, сдвиги резонансной частоты и изменение добротности являются информативными показателями свойств среды, а вариации сдвигов резонансной кривой в среде позволяют судить о ее изменениях. В ряде случаев, в частности для разреженных сред, например, газа при нормальных условиях, $\varepsilon \sim 1$, а уменьшение давления на 1% приводит к изменению ε всего лишь в 6-7 знаке после запятой. Такого же порядка будут и относительные сдвиги резонанса. При стандартном способе измерения резонансной частоты необходимо, чтобы сдвиг частоты превосходил ширину резонансной кривой, определяемой добротностью контура. Чем больше добротность, тем меньшие сдвиги можно измерять, и тем меньше вариации ε можно фиксировать. Однако, при использовании удобных для практического применения отрезков длинных линий в качестве резонатора, добротность редко превышает 500-1000. Потому сдвиги должны быть не менее 0.001 от собственной частоты. Это указывает на предел применимости классического подхода в резонансных методах для точного определения резонанса. В то же время, возможности современной аппаратуры позволяют генерировать и фиксировать частоту СВЧ сигнала с точностью до 10^{-8} и лучше. Данное ограничение снимается при измерениях «внутри» резонансной кривой с использованием амплитудно-фазового метода, суть которого состоит в измерении набега фазы сигнала, пропорционального разности частот опорного сигнала и прошедшего через резонатор. В рамках данной методики измерения проводятся на фиксированной частоте, соответствующей «вакуумной» резонансной частоте измерительной системы в отсутствие исследуемой среды, а малые изменения резонансной частоты системы в пределах ширины линии собственного резонанса регистрируются посредством амплитудно-фазовых характеристик резонатора.

В данной главе диссертации развита амплитудно-фазовая методика измерения малых вариаций диэлектрической проницаемости однородных сред с помощью резонансного СВЧ-зонда на отрезке длинной линии применительно к диагностике концентрации слабозамагниченной плазмы (раздел 2.1) и давления газов (раздел 2.2).

Раздел 2.1 посвящен краткому обзору методов измерения концентрации плазмы. Здесь же приведена стандартная методика измерения плотности плазмы по сдвигу максимума резонансной кривой с помощью СВЧ зонда на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии и показано развитие этого метода в плане расширения функциональных возможностей и повышения точности измерения абсолютных значений концентрации. В разделе 2.1.1 представлена методика измерения и условия ее применимости. Здесь же приведена конструкция диагностического датчика. Теоретический расчет, позволяющий связать регистрируемый на приемной аппаратуре сигнал с измеряемой величиной концентрации, описан в разделе 2.1.2. Раздел 2.1.3 посвящен экспериментальной апробации предложенного метода на плазменном стенде при исследовании пространственно-временных распределений концентрации плазмы. Полученные результаты сопоставляются с теоретическими расчетами. Высокая чувствительность фазового метода продемонстрирована на примере измерений давления газа СВЧ зондом на полуволновом отрезке коаксиальной линии (раздел 2.2). Там же приведен анализ способов диагностики вакуумного давления. В разделе 2.2.1 приводится описание измерительной системы и теоретическая модель датчика. Экспериментальные результаты с описанием конструктивных особенностей измерительной системы приведено в разделе 2.2.2. Общие выводы по данной главе сформулированы в разделе 2.3.

2.1 Измерение концентрации плазмы в широком диапазоне значений резонансным малогабаритным СВЧ-зондом

Электронная компонента концентрации плазмы может быть измерена с помощью хорошо известных диагностик, таких как электрические зонды, эмиссионная и абсорбционная спектроскопия, СВЧ методы, спектроскопия самовозбуждения с помощью электронного резонанса. Эти методы отличаются, в первую очередь, степенью возмущения параметров плазмы, условиями применимости и диапазоном измеряемых значений. Далее будет представлен краткий обзор перечисленных методов диагностики концентрации плазмы.

Первые измерения параметров плазмы были выполнены с помощью электрических зондов, предложенных Ленгмюром в 1924г. [16, 17] Зонд представляет собой металлический электрод (плоский, сферический, цилиндрический), погруженный в плазму. Зонд соединяется с источником питания, позволяющим поддерживать на нем различные напряжения, положительные или отрицательные относительно плазмы; при этом ток, идущий через плазму, дает сведения о концентрации и температуре плазмы [18].

Вольтамперная характеристика зонда (ВАХ) в общем случае включает в себя три характеристики: ВАХ слоя пространственного заряда у поверхности зонда, ВАХ положительного столба и ВАХ слоя у опорного электрода. Стоит принимать во внимание влияние на ВАХ зонда магнитного поля, эффект столкновений, загрязнений поверхности измерительных электродов. Несмотря на локальность метода, теория, связывающая полученную ВАХ зонда с искомыми характеристиками плазмы, оказывается в общем случае сложной и не всегда позволяет проводить корректные измерения параметров плазмы без априорных предположений либо калибровочных данных, полученных другими методами [16].

Метод объемного резонатора обладает хорошей чувствительностью к концентрации плазмы. Введение плазмы в резонатор, настроенный на одну из собственных частот, приводит к изменению резонансной частоты и добротности, измеряя которые, можно определить активную и реактивную составляющие проводимости плазмы и связанные с этими составляющими концентрацию и частоту столкновений электронов. Каждый из типов колебаний характеризуется определенным распределением высокочастотных полей по объему резонатора. Эти распределения и значения собственных частот определяются в результате интегрирования уравнений поля для полости резонатора с соответствующими граничными условиями. Для определения параметров резонатора с плазмой необходимо в общем случае провести интегрирование уравнений поля с учетом активной и реактивной составляющей высокочастотного тока в плазме. Основным условием применимости данной диагностики является малость относительного сдвига частоты и отсутствие связанных типов колебаний в резонаторе, что делает метод неприменим в плотной плазме. Другой недостаток метода объемного резонатора связан с тем, что он дает не локальное значение концентрации, а усредненное по объему, занятому плазмой.

Методы, основанные на прохождении волн через плазму, позволяют восстановить концентрацию плазмы по «отсечке» сигнала: при приближении частоты зондирующей волны к критической частоте плазмы амплитуда прошедшего через столб плазмы падает. Схема измерений максимальной концентрации электронов по отсечке волны весьма проста. Сигнал от генератора через развязку подводится к передающей антенне (излучателю), формирующей направленную зондирующую волну. Прошедший через плазму сигнал регистрируется приемной антенной и попадает на детектор. При использовании схем с несколькими генераторами, по серии сигналов «отсечки» на различных частотах легко могут быть построены кривые нарастания и спада концентрации электронов в нестационарном разряде. Основные трудности при

определении концентрации электронов по отсечке связаны с необходимостью осуществления такой фокусировки волны, при которой поперечные размеры области локализации волны значительно меньше размеров плазмы и волна распространяется в направлении градиента концентрации электронов. В противном случае волны, распространяющиеся под углом к градиенту концентрации, будут отражаться при меньших концентрациях. Таким образом, если фокусировка зондирующей волны недостаточно эффективна, то отсечка сигнала оказывается нерезкой и индикация критической концентрации неточной.

Более детальные сведения о концентрации и частоте столкновений электронов могут быть получены при измерениях характеристик прошедшей через плазму волны. Величину фазового сдвига волны и степень ее ослабления с помощью микроволновой интерферометрии. Волна, излучаемая рупорной или линзовой антенной, проходит через область, занятую плазмой, и приобретает дополнительный набег фазы, зависящий от плотности плазмы, принимается второй антенной. Данный способ измерения плотности имеет недостатки, аналогичные для метода «отсечки». Отражение от внутренних стенок камеры часто приводит к появлению ложных интерференционных сигналов и вызывает флуктуации амплитуды.

Для диагностики параметров плазмы наиболее успешно используется СВЧ-зонд с резонатором. В отличие от других методов диагностики, таких как интерферометрический, метод объемного резонатора, резонансный СВЧ-зонд позволяет определять локальное значение концентрации. В сравнении с традиционно используемыми в плазменных экспериментах ленгмюровскими зондами, показания резонансного СВЧ-зонда не зависят от температуры электронов плазмы, и в линейном режиме определяются только концентрацией плазмы.

Резонансный СВЧ-зонд, впервые предложенный R. L. Stenzel в 1976 году [1], успешно применяется для локальных измерений концентрации плазмы в научных лабораторных экспериментах [19-22] и в коммерческих плазменных установках [23, 24]. Зонд представляет собой миниатюрный четвертьволновый резонатор в виде отрезка двухпроводной линии закороченной с одной стороны и разомкнутой с другой.

Резонансная частота ω_{res} данной диагностики зависит от диэлектрической проницаемости плазмы ε , причем $\omega_{res} = \frac{\omega_0}{\sqrt{\varepsilon}}$, где ω_0 - резонансная частота СВЧ-зонда без плазмы. В

случае изотропной плазмы $\varepsilon = 1 - \omega_{pe}^2 / \omega^2$ а выражение для ω_{res} , согласно [1] принимает следующий вид:

$$\omega_{res}^2 = \omega_{0res}^2 + \omega_{pe}^2 \quad (2.1)$$

Таким образом, измеряя собственную частоты резонатора без плазмы и в плазме (2.1), легко найти плазменную частоту ω_{pe} , а, следовательно, и концентрацию плазмы

$$N = \frac{m\omega_{pe}^2}{4\pi e^2}.$$

Отметим, что (2.1) справедливо в слабозамагниченной плазме при условии $\omega_{res} \gg \omega_{Be}$, где ω_{Be} - электронная циклотронная частота. Действительно, выписывая продольную ϵ_{\parallel} и поперечную ϵ_{\perp} относительно магнитного поля составляющие тензора диэлектрической проницаемости плазмы, имеем

$$\epsilon_{\parallel} = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}, \quad \epsilon_{\perp} = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 - \omega_{Be}^2}$$

При $\omega \gg \omega_{Be}$ $\epsilon_{\perp} \approx \epsilon_{\parallel}$ и реализуется режим изотропной плазмы.

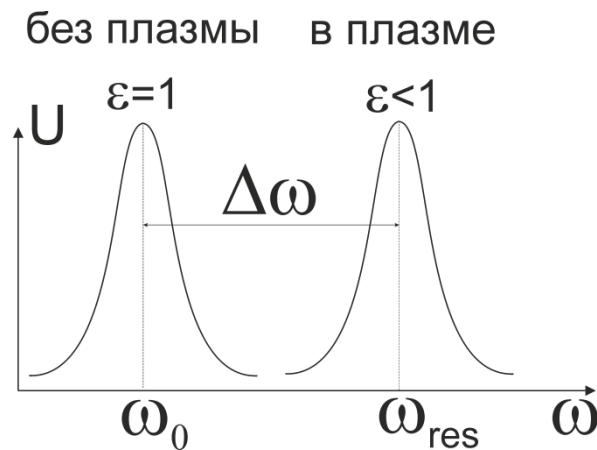


Рис. 2.1 Резонансная кривая СВЧ-зонда без плазмы и в плазме. ω_0 - резонансная частота в вакууме, ω_{res} - резонансная частота в плазме.

В случае стационарной плазмы, концентрация определяется следующим образом. На зонд подается СВЧ сигнал, частота которого меняется во времени по известному закону. Тогда в момент наступления резонанса определяют частоту зонда в плазме и концентрацию электронов в соответствии с (2.1). В случае нестационарной плазмы, распадающейся во времени, к резонатору подводится СВЧ сигнал на фиксированной частоте ω , большей вакуумной ω_0 (Рис. 2.2). При появлении резонансного отклика с измерительной системы $U(t)$ определяют концентрацию электронов Ne . Сканируя частотой подаваемого на зонд сигнала, можно получить зависимость плотности плазмы от времени $Ne(t)$.

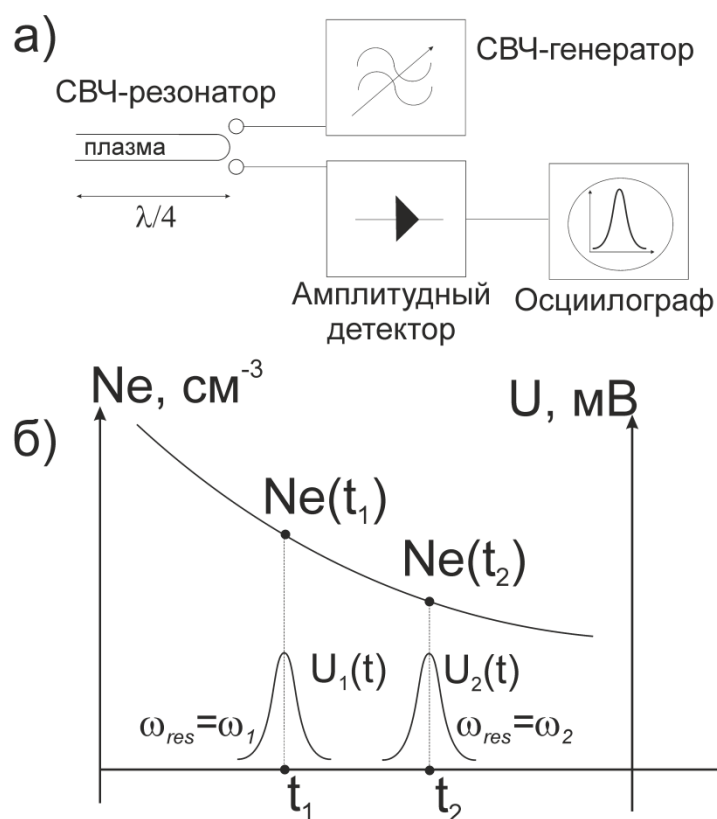


Рис. 2.2. Стандартный метод измерения концентрации распадающейся во времени плазмы СВЧ-зондом: (а) – блок схема измерений; (б) – иллюстрация нахождения электронной концентрации при подачи за зонд СВЧ-сигнала на фиксированной частоте $\omega_{res} > \omega_0$. $U(t)$ – резонансный отклик с детектора. Резонанс наступает при выполнении условия $\omega_{res}^2 = \omega_0^2 + \omega_{pe}^2(Ne)$. Варьируя частотой ω_{res} , можно восстановить зависимость концентрации от времени $Ne(t)$.

Метод резонансного СВЧ-зонда в работах [15, 24-30] получил дальнейшее развитие в плане расширения функциональных возможностей и повышения точности измерения абсолютных значений концентрации.

В работе [15] проведено теоретическое и экспериментальное исследование влияния нелинейных эффектов на работу плазменного СВЧ-зонда, связанных со стрикционным воздействием СВЧ-полей на плазму вблизи проводов резонатора. Было показано, что резонансный зонд на отрезке двухпроводной линии в нелинейном режиме можно успешно использовать не только для измерения концентрации плазмы, но и ее температуры.

В работах [20, 25] развита методика измерения малых возмущений электронной концентрации в плазме низкого давления с помощью резонансного СВЧ-зонда. Продемонстрирована высокая чувствительность метода, позволяющая регистрировать относительные возмущения концентрации электронов порядка $10^{-5} - 10^{-6}$ в плазме с

концентрацией 10^{10} – 10^{12} см⁻³. Высокая чувствительность метода достигается путем регистрации на выходе измерительной системы амплитудно-модулируемого сигнала на частоте флуктуаций электронной концентрации. Возможности метода продемонстрированы при исследованиях генерации волн рамочной антенной в нестационарной магнитоактивной плазме. Экспериментально изучено пространственное распределение колебаний плотности возбуждаемых магнитной рамочной антенной в нижнегибридном диапазоне частот. Показано, что мелкомасштабные флуктуации плотности обусловлены квазипотенциальными волнами с большими значениями волнового вектора, возбуждающим элементом которых является провод, образующий рамочную антенну. Полученная с помощью СВЧ-зонда информация о пространственной структуре флуктуаций электронной концентрации хорошо согласуется с теоретическими расчётами.

В работе [26, 27] продемонстрировано, что резонансный СВЧ-зонд может быть применен не только в слабозамагниченной плазме, но и в плазме с присутствием сильного магнитного поля. Найдена теоретическая связь резонансной частоты зонда с концентрацией плазмы и величиной внешнего магнитного поля, которая получила экспериментальное подтверждение. Установлено, что резонансная частота зависит от ориентации зонда во внешнем магнитном поле, что находится в полном соответствии с приведенными в работе выражениями для поперечной и продольной диэлектрической проницаемости.

В работе [28, 29] изучено влияние на показания СВЧ-зонда двойного слоя, возникающего вокруг цилиндрических проводов резонатор. Развита математическая модель зонда позволяющая учитывать двойной слой вокруг резонатора и вносить коррекцию в результаты измерений.

В [20] метод резонансного СВЧ-зонда был модифицирован для бесконтактной диагностики плазмы атмосферного давления. Продемонстрирована эффективность метода для измерения параметров плазмы емкостного высокочастотного емкостного разряда в аргоне. Показано, что для плазмы атмосферного давления возможны измерения мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости плазмы или величины отношения N/v . Результаты измерений хорошо согласуются данными, полученными методом «отсечки» СВЧ-излучения и теоретическими оценками. Развита методика может успешно применяться в плазмохимических установках, а также для диагностики параметров плазменной оболочки, окружающей спускаемые космические аппараты при их вхождении в плотные слои атмосферы.

При исследовании плазмы с помощью СВЧ-зонда важными параметрами являются динамический диапазон, чувствительность и пространственное разрешение диагностики. При стандартном способе измерений [1] чувствительность СВЧ-зонда определяется точностью измерения сдвига резонансной частоты $\Delta\omega$. Данная величина определяется добротностью Q резонансной системы, причем $\Delta\omega = \omega_0 / Q$. Минимальное измеряемое значение концентрации, соответствующее частотному сдвигу $\Delta\omega$ в соответствии с [1] определяется выражением $\omega_p^2 \approx (2/Q)\omega_0^2$. При необходимости измерения более низких значений концентрации плазмы приходится использовать СВЧ-зонд с меньшей резонансной частотой и большей длиной резонатора, что ухудшает пространственное разрешение диагностики. В данной работе предлагается методика измерения концентрации плазмы с помощью СВЧ-зонда, позволяющая не увеличивая геометрических параметров резонатора уменьшить минимальное измеряемое значение концентрации на несколько порядков, тем самым существенно расширить динамический диапазон измерительной системы вниз по концентрации. В рамках данной методики измерения проводятся на фиксированной частоте, соответствующей резонансной частоте СВЧ-зонда без плазмы, а малые изменения резонансной частоты системы в пределах ширины собственного резонанса регистрируются посредством амплитудно-фазовых измерений.

2.1.1 Амплитудно-фазовый метод измерения концентрации плазмы

Методика, расширяющая динамический диапазон СВЧ-зонда вниз по концентрации, рассмотрена на примере малогабаритного СВЧ-зонда с собственной резонансной частотой $\omega_0 / 2\pi = 2034$. Резонатор измерительной системы выполнен на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии длиной $l=3.5$ см, закороченном на одном конце и разомкнутом на другом (Рис. 2.3). Расстояние между проводами резонатора 3 мм, материал проводов – медная проволока диаметром 0.75 мм. Возбуждение резонатора и прием его отклика осуществлялся посредством магнитных петель связи диаметром $D=3$ мм, расположенных у закороченного конца. Размер рамок передающих линий удовлетворял условию квазистатического распределения тока по их длине ($\pi D < \lambda / 8$). Для передачи высокочастотного сигнала использовался коаксиальный кабель с волновым сопротивлением $\rho_c = 50$ Ом. Добротность резонатора СВЧ-зонда $Q=150$, полуширина резонансной кривой $\Delta\omega=13.56$ МГц, минимальное значение измеряемой концентрации

традиционной методикой $N_{\min} \sim 10^9 \text{ см}^{-3}$. Для регистрации более низких значений концентрации, соответствующих сдвигам резонансной частоты в пределах ширины собственного резонанса, предлагается использовать метод амплитудно-фазовых измерений. Использование данного метода оправдано только в случае, когда добротность резонатора не зависит от концентрации плазмы в рабочем диапазоне.

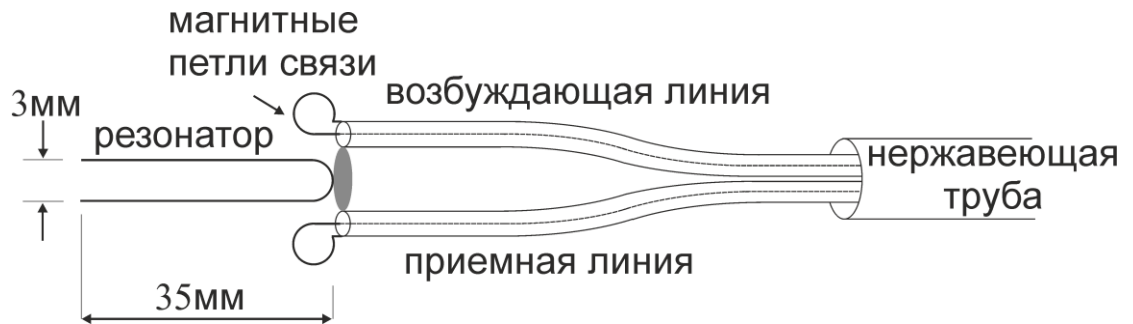


Рис. 2.3 Конструкция резонансного СВЧ-зонда для измерения концентрации плазмы. Собственная частота резонатора 2ГГц.

Добротность СВЧ-зонда Q определяется рядом факторов, а именно, связью с возбуждающей и приемной линиями, омическими потерями в проводах резонатора, потерями на излучение, столкновительными потерями в плазме.

Добротность Q_{Ω} , связанная с омическими потерями в проводах резонатора определяется выражением $Q_{\Omega} = \frac{n\pi}{2\alpha l}$ [13], где α - коэффициент ослабления сигнала в двухпроводной линии, образующей резонатор, $n=1$ - номер моды. При $\alpha = 1.5 \times 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, $l=3.75$ см получаем, что $Q_{\Omega} \sim 2800$.

Добротность Q_{col} , обусловленная столкновительными потерями в плазме, в соответствии с [14] равна $Q_{col} = \frac{\omega_0(\omega_0^2 + \nu^2)}{\omega_{pe}^2 \nu}$, где ν - частота столкновений электронов.

Для аргоновой плазмы с концентрацией менее 10^9 см^{-3} , температурой электронов 0,5эВ и рабочим давлением нейтрального газа $3 \cdot 10^{-3} \text{ Torr}$ оказывается, что $\nu \sim 10^8 \text{ с}^{-1}$, а $Q_{col} > 7000$.

Добротность СВЧ-зонда, обусловленная радиационными потерями, находится путем расчета сопротивления излучения четвертьволнового отрезка двухпроводной линии. Воспользуемся определением добротности:

$$Q_{rad} = \frac{\omega_{res} W_r}{P_0} \quad (2.2)$$

где $W_r = lLI_0^2/4$ - энергия, запасенная в резонаторе, $L = 8.3 \cdot 10^{-7} \Gamma\text{H}/\text{м}$ - погонная индуктивность двухпроводной линии, образующей резонатор, I_0 - амплитуда тока в резонаторе, $P_0 = I_0^2 R_{rad}$ - мощность излучения, R_{rad} - сопротивление излучения. Для нахождения R_{rad} рассмотрим резонатор как систему двух активных четвертьволновых вибраторов с противофазными токами, расположенными на расстоянии D (рис. 2.4).

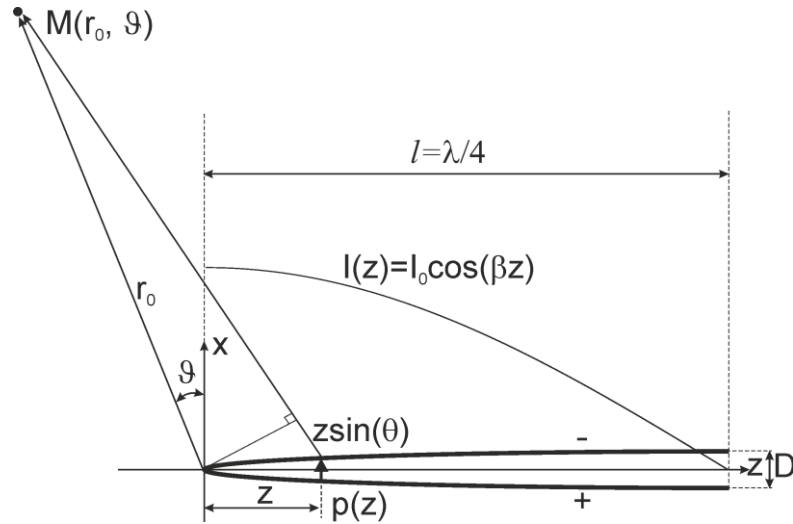


Рис. 2.4 Схема расчета мощности излучения четвертьволнового резонатора. $I(z)$ - распределение тока по длине резонатора, $p(z)$ - дипольный момент, ориентированный в плоскости резонатора, $z(\sin\theta)$ - фазовый сдвиг по отношению к полю, создаваемому таким же диполем в точке $z = 0$.

Поле излучения резонатора в точке $M(r)$ можно представить как сумму полей, создаваемых элементарными электрическими диполями с переменными моментами [14, 31]:

$$p_s(z) = \frac{I_0}{\omega} \cdot \cos(\beta z) \cdot \beta \cdot D \cdot dz \quad (2.3)$$

где $\beta = 2\pi/\lambda$ - волновое число, $\lambda = 2\pi c/\omega_0$ - длина волны в вакууме, c - скорость распространения электромагнитного излучения в вакууме. Поле излучения элементарного диполя на расстоянии $r_0 \gg l$, находящегося в точке z , запишется в виде:

$$dE = 60 \cdot \pi \cdot I_0 \cdot \cos(\beta z) \cdot \frac{D}{\lambda} \cdot \frac{\sin(\theta)}{r_0} \cdot \beta \cdot e^{-j\beta(r_0 - z \cdot \sin(\theta))} dz \quad (2.4)$$

где $z \cdot \sin(\theta)$ - фазовый сдвиг по отношению к полю, создаваемому таким же диполем в точке $z = 0$. Поле излучения резонатора в точке с координатами r_0, θ определяется путем интегрирования по всей длине резонатора:

$$E(r_0, \theta) = \int_0^{l=\lambda/4} dE = 60 \cdot \pi \cdot I_0 \cdot \frac{D}{\lambda} \cdot \frac{\sin \theta}{r_0} \cdot \frac{e^{j\pi/2 \cdot \sin \theta} - j \sin \theta}{\cos^2 \theta} \quad (2.5)$$

Мощность излучения находится интегрированием по углу θ :

$$P_{rad} = \int_0^\pi r_0^2 \cdot \sin \theta \cdot \frac{E^2}{120} d\theta = 0.95 \cdot I_0^2 \quad (2.6)$$

Энергия, запасенная в резонаторе, имеет вид: $W_r = lLI_0^2 / 4$, где $L = 8.3 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - погонная индуктивность двухпроводной линии, образующей резонатор. Подставляя W_r и P_{rad} в (2.2), получим $Q_{rad} \sim 400$.

Потери, обусловленные магнитной связью резонатора с передающей и приемной линиями, определяются вносимым в резонатор сопротивлением R_s . Следуя [16]

$$R_s = 2 \frac{(\omega M)^2}{\rho_c}, \text{ а } Q_s = \frac{\pi}{4} \frac{\rho \rho_c}{(\omega M)^2}, \text{ где } M - \text{ коэффициент взаимной индукции между петлями}$$

связи и резонатором, ρ – волновое сопротивление двухпроводной линии, образующей резонатор. Для рассматриваемого СВЧ-зонда $\rho = 166 \text{ Ом}$, $\rho_c = 50 \text{ Ом}$, $M \sim 0.2 \text{ нГн}$, тогда $Q_s \sim 240$.

Суммарная добротность Q выражается с помощью следующей зависимости:

$$Q = \left(\frac{1}{Q_\Omega} + \frac{1}{Q_{col}} + \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_{coup}} \right)^{-1} \sim 150. \text{ Как видно из приведенных оценок, } Q \text{ определяется}$$

максимальными потерями, а именно, связью резонатора с приемной и передающей линиями и потерями на излучение. Столкновительные потери в плазме малы и не изменяют добротность СВЧ-зонда. Экспериментально измеренная добротность хорошо соотносится с теоретическими оценками.

Амплитудно-фазовый метод измерения концентрации плазмы с помощью СВЧ-зонда был реализован в схеме, приведенной на рис. 2.5. Суть метода состоит в измерении фазы сигнала, прошедшего через резонатор.

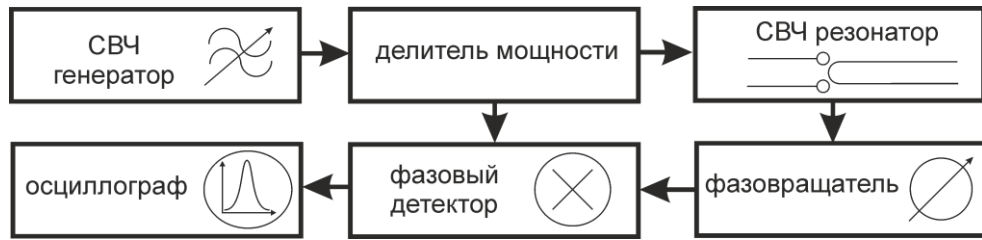


Рис. 2.5. Схема амплитудно-фазовых измерений концентрации плазмы резонансным СВЧ-зондом.

В качестве источника высокочастотного сигнала использовался свип-генератор в виде быстродействующего синтезатора частот на основе однопетлевой системы ФАПЧ с возможностью генерации на фиксированной частоте. Стабильность частоты генератора была на уровне 10^{-8} . Сигнал генератора амплитудой $U_g = 2.5$ В и частотой $f_0 = 2034$ МГц, соответствующей резонансной частоте СВЧ-зонда без плазмы, с помощью резистивного делителя мощности делится на два равных сигнала $U_g / 2$, один из которых с помощью коаксиального кабеля подводился к возбуждающей петле резонатора, второй к фазовому детектору в качестве опорного сигнала. Фазовый детектор был выполнен на микросхеме ADE-25MH+. Высокочастотный сигнал U_{res} с приемной петли связи посредством коаксиального кабеля подводился к фазовращателю, после которого поступал на вход фазового детектора, формирующего сигнал, зависящий от амплитуды сигнала U_{res} и разности фаз $\Delta\varphi$ между U_{res} и опорным сигналом $U_g / 2$. Суммарное затухание высокочастотного сигнала в измерительной схеме составляло $k = -10$ дБ. Результирующий сигнал U_{out} оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя и записывался в память компьютера для дальнейшей обработки.

При отсутствии плазмы, с помощью фазовращателя на частоте f_0 между сигналами U_{res} и опорным $U_g / 2$ устанавливалась разность фаз 90° . Наличие плазмы приводило к смещению резонансной частоты датчика на величину Δf относительно f_0 и появлению дополнительного набега фазы $\Delta\varphi$ прошедшего через него сигнала, причем

$$U_{out} = k U_{res} \sin(\Delta\varphi) \quad (2.6)$$

2.1.2 Математическое описание датчика для измерения электронной концентрации плазмы

Для связи амплитуды выходного сигнала с концентрацией плазмы воспользуемся выражением для тока в приемной петле (1.13), полученном в первой главе диссертации.

Учитывая связь между напряжением и током в приемной петле $I_3 = i \frac{U_3}{\rho_c}$ и выделяя

модуль и фазу комплексного напряжения U_3 , можно получить выражения для амплитуды $U_{res} = |U_3|$ и набега фазы $\Delta\varphi$ сигнала, прошедшего через резонатор:

$$U_{res} = \frac{U_0}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\delta\omega + \frac{\delta\varepsilon}{2} \right)^2}} \quad (2.7)$$

$$\text{tg}(\Delta\varphi) = Q_0 \left(\delta\omega + \frac{\delta\varepsilon}{2} \right) \quad (2.8)$$

Уравнения (2.7) и (2.8) представляют собой амплитудно-частотную и фазочастотную характеристику резонатора, соответственно. При помощи (2.7) и (2.8) амплитудно-фазовая характеристика резонатора, соответствующая (2.6) записывается следующим образом:

$$U_{out} = \frac{k U_0 Q \left(\delta\omega + \frac{\delta\varepsilon}{2} \right)}{1 + Q^2 \left(\delta\omega + \frac{\delta\varepsilon}{2} \right)^2} \quad (2.9)$$

Для подтверждения правильности развитой электродинамической модели, на примере рассматриваемого в работе СВЧ-зонда с собственной резонансной частотой $\omega_0/2\pi = 2034$ МГц, была рассчитана с помощью (2.9) и экспериментально измерена зависимость $U_{out}(\delta\omega, \delta\varepsilon = 0)$ в случае отсутствия плазмы, когда $\delta\varepsilon = 0$. Как видно из рис. 2.6, теоретическая кривая $U_{out}(\delta\omega, \delta\varepsilon = 0)$ в пределах ширины собственного резонанса хорошо согласуется с соответствующей экспериментальной зависимостью. За пределами ширины собственного резонанса расхождения обусловлены влиянием изменения набега фазы сигнала в соединительных коаксиальных линиях измерительной схем СВЧ-зонда при изменении частоты.

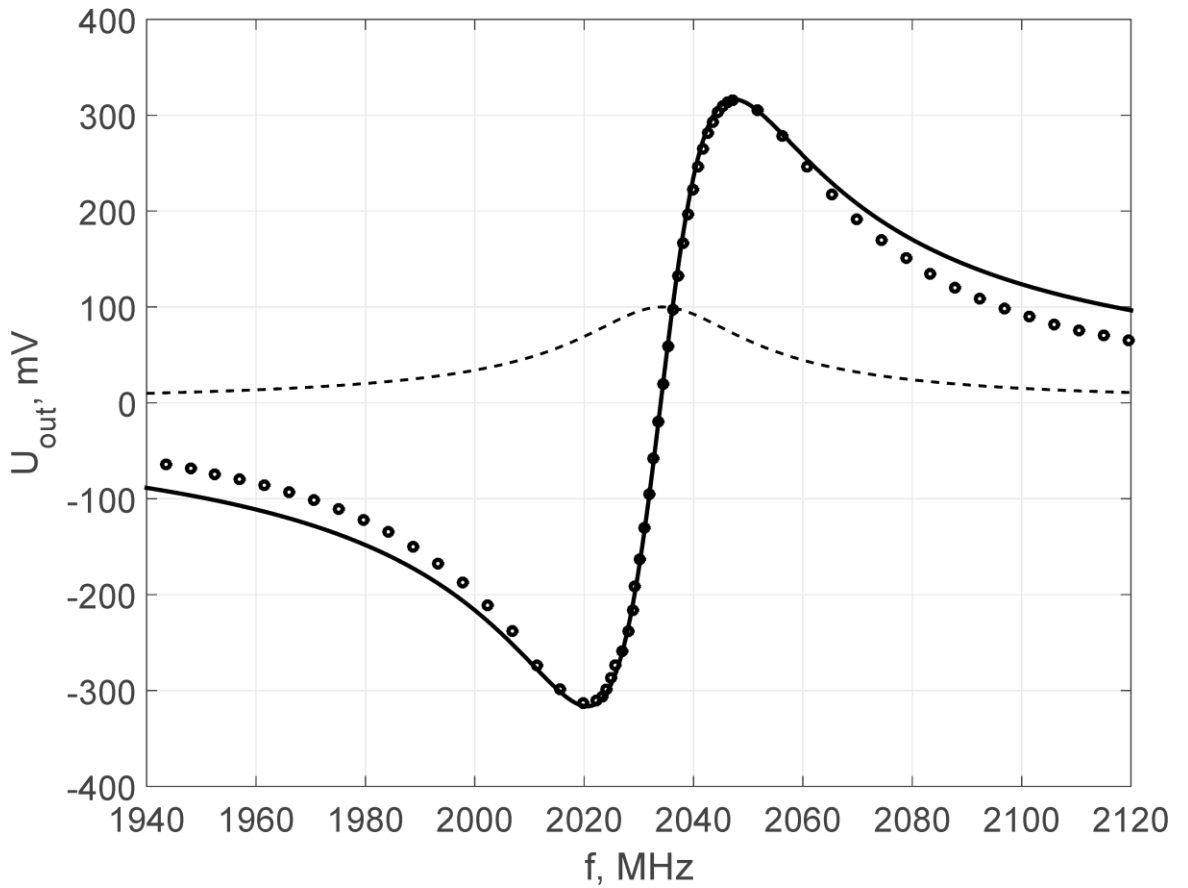


Рис. 2.6 Частотная зависимость амплитуды выходного сигнала U_{out} в схеме, реализующей амплитудно-фазовую методику измерения концентрации плазмы с помощью СВЧ-зонда, в случае отсутствия плазмы: о - экспериментальные значения, сплошная линия – теоретическая зависимость, рассчитанная по (2.9) при $\delta\varepsilon = 0$, пунктирная кривая – резонансная кривая СВЧ-зонда. Нулевой сигнал U_{out} соответствует собственной резонансной частоте $f_0 = 2034$ МГц.

При помещении СВЧ-зонда в плазму (случай когда $\delta\varepsilon \neq 0$) частотная зависимость $U_{out}(\delta\omega, \delta\varepsilon \neq 0)$ соответствует кривой $U_{out}(\delta\omega, \delta\varepsilon = 0)$, сдвинутой как единое целое вверх по частоте на величину $\delta\omega = -\frac{\delta\varepsilon}{2}$. Это справедливо только в случае, когда плазма не оказывает влияние на добротность резонатора СВЧ-зонда. Амплитуда сигнала U_{out} на собственной резонансной частоте ω_0 (при $\delta\omega = 0$) связана с концентрацией плазмы следующим соотношением:

$$U_{out}(\delta\varepsilon) = \frac{kU_0Q\delta\varepsilon}{2 + Q^2\delta\varepsilon^2}, \delta\varepsilon = -\frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}. \quad (2.10)$$

При практическом применении амплитудно-фазового метода встает вопрос о верхнем пределе давления рабочего газа. Для оценки максимального давления воспользуемся следующими соображениями. Пусть добротность резонатора без плазмы $Q=Q_0$, а с плазмой $Q=Q_0+\Delta Q$. При фиксированном уровне выходного сигнала $U_{out} = const$ учет добротности, связанной со столкновительными потерями в плазме, приведет к ошибке в изменении концентрации Ne на величину ΔN . Из (2.10) можно получить, что: $\frac{\Delta Ne}{Ne} \approx \frac{\Delta Q}{Q_0}$

. Если принять точность измерения концентрации на уровне $\alpha \times 100\%$, что эквивалентно $\frac{\Delta Ne}{Ne} = \alpha$, получим, что $\Delta Q = \alpha Q_0$.

Добротность резонатора, обусловленная столкновительными потерями в плазме, выражается приведенной выше формулой $Q_{pl} = \frac{\omega_0(\omega_0^2 + \nu^2)}{\omega_{pe}^2}$. Она определяется

собственной частотой СВЧ-зонда ω_0 , величиной плазменной частоты ω_{pe} , зависящей от концентрации плазмы, и электронной частоты столкновений ν , определяемой температурой электронов и давлением нейтрального газа. Q_{pl} и ΔQ связаны следующим

выражением $\frac{Q_{pl}Q_0}{Q_{pl} + Q_0} = Q_0 + \Delta Q$, откуда получим, что $Q_{pl} = \frac{Q^2}{\Delta Q} - Q_0$. Если $Q_{pl} > \frac{Q^2}{\Delta Q} - Q_0$

то $\frac{\Delta N}{N} < \alpha$. Для рассматриваемого СВЧ-зонда с $Q_0=150$ при $\alpha=0.1$ оказывается, что $Q_{pl} = 1325$. При $Q_{pl} > 1325$ точность измерения концентрации будет меньше 10%. При давлении нейтрального газа $3 \cdot 10^{-3}$ Торр и температуре электронов 0,5эВ плазменная добротность $Q_{pl} > 7000$. Тогда изменение добротности Q_{pl} от 7000 до 1325 соответствует повышению давления нейтрального газа от $3 \cdot 10^{-3}$ до $1.5 \cdot 10^{-2}$ Торр. При точности изменения концентрации 100% диагностика может работать при давлениях не более $1.5 \cdot 10^{-1}$ Торр.

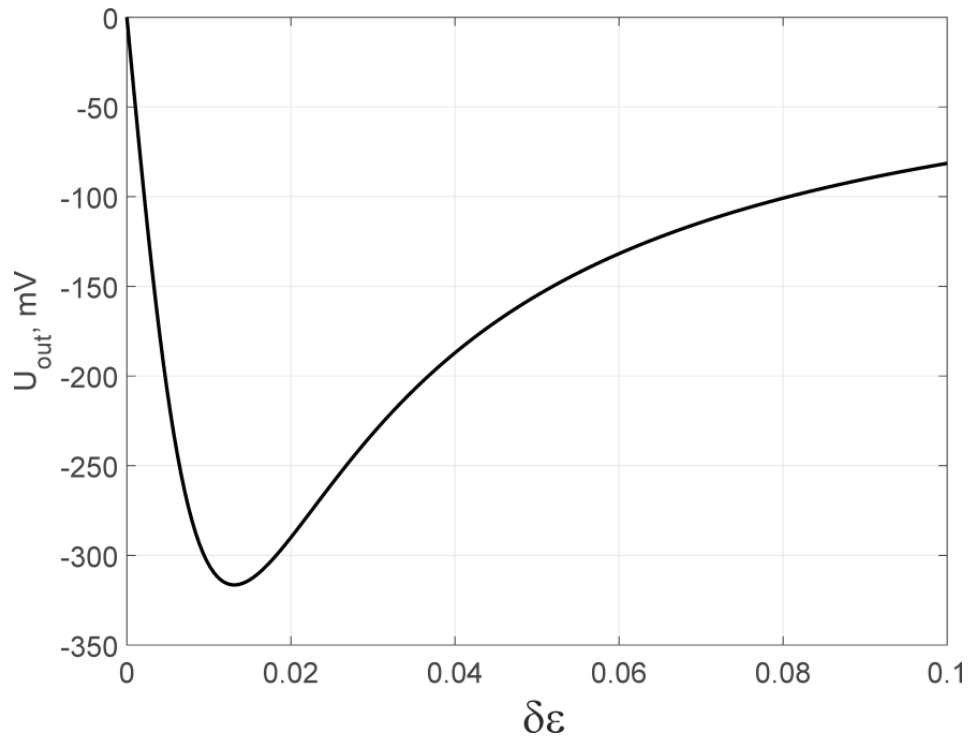


Рис. 2.7 Зависимость амплитуды выходного сигнала U_{out} на собственной резонансной частоте ω_0 СВЧ-зонда от величины $\delta\epsilon = -\frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}$ в схеме реализующей амплитудно-фазовую методику измерения.

Зависимость $U_{out}(\delta\omega = 0, \delta\epsilon)$ на рис. 2.7 имеет экстремум при $\delta\epsilon^* = -\frac{2}{Q}$, соответствующей минимальной концентрации плазмы, измеряемой стандартной для СВЧ-зонда методикой [1] и определяющей верхнюю границу диапазона концентраций, регистрируемых амплитудно-фазовым методом.

С помощью (2.10) можно оценить минимальную концентрации Ne_{min} , регистрируемую с помощью амплитудно-фазовой методики. Ее величина определяется шумовой составляющей δU_{out} выходного сигнала U_{out} с фазового детектора, причем

$$Ne_{min} = \frac{m}{2\pi e^2} \frac{\omega_0^2}{QU_0 k} \delta U_{out}. \text{ При } Q=150, k=-10\text{dB}, U_0=2\text{В}, \delta U_{out}=0.5\text{мВ}, \omega_0/2\pi=2034\text{МГц}$$

получаем, что $Ne_{min} \sim 5 \cdot 10^5 \text{см}^{-3}$.

2.1.3 Экспериментальные результаты

Тестирование измерительной системы проводилось на крупномасштабной плазменной установке «Ионосфера». Экспериментальная установка представляет собой вакуумную камеру из немагнитной нержавеющей стали длиной 1.5м и диаметром 1.2м (рис. 2.9).

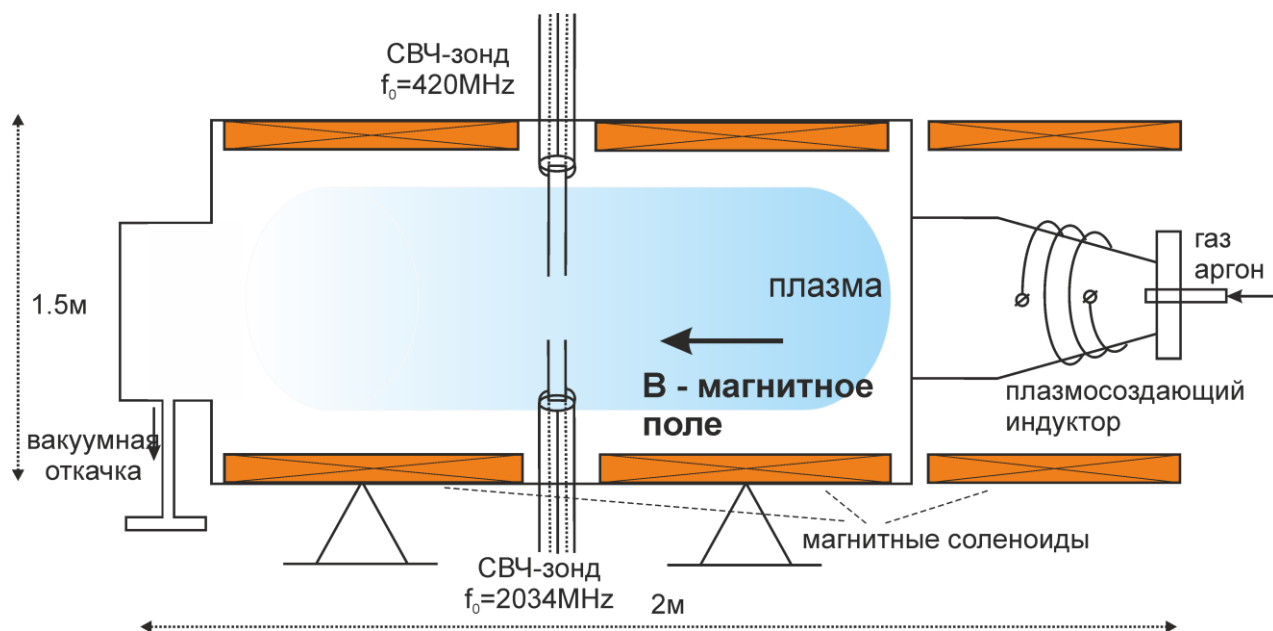


Рис. 2.9 Схема экспериментальной установки «Ионосфера»

Внешнее аксиальное магнитное поле $B = 6 \cdot 10^{-3}$ Тл создавалось тремя катушками, размещенными внутри вакуумной камеры, диаметром 0.8м и длиной 0.35м каждая. Продольный размер однородного участка магнитного поля равнялся 1.2м. Предельный остаточный вакуум, достигаемый в камере, составлял величину $3.5 \cdot 10^{-6}$ Торр. В качестве рабочего газа использовался аргон при давлении $3.3 \cdot 10^{-3}$ Торр. Для создания квазиоднородного плазменного столба использовался индукционный ВЧ-разряд (частота генератора 5 МГц, выходная мощность 100 кВт, длительность высокочастотного импульса 2 мс, период повторения 10 с). За время разряда концентрация плазмы достигала значения 10^{12} см^{-3} , температура электронов 5 эВ. После окончания работы генератора за время $\tau_T \sim 0.3$ мс температура электронов релаксирует до квазистационарного значения 0.5 эВ, соответствующего температуре нейтрального газа. Все эксперименты проводились в режиме распадающейся плазмы, то есть после выключения высокочастотного источника. Характерное время спада концентрации $\tau_N \sim 8$ мс.

Для проверки результатов, измерения концентрации плазмы с применением фазовой методики, в качестве независимой диагностики использовался низкочастотный СВЧ-зонд с собственной резонансной частотой $f_0 = 420 \text{ МГц}$ (длина резонатора 18 см) и добротностью 250, работающий с применением стандартного способа измерений [1]. Для ввода диагностик внутрь плазменного стенда использовались диаметрально противоположные штанги с вакуумным уплотнением, подвижные в радиальном направлении относительно оси камеры.

Осциллограмма выходного сигнала в схеме, реализующей амплитудно-фазовый метод измерения концентрации плазмы с помощью СВЧ-зонда, приведена на рис. 2.10. Зонд располагался в центре плазменной установки. В процессе распада плазмы выходной сигнал в измерительной схеме менялся в соответствии с амплитудно-фазовой характеристикой (2.10) СВЧ-зонда. При времени $t^* = 52 \text{ мс}$ после окончания работы плазмоздающего источника на осциллограмме наблюдается минимум выходного сигнала, соответствующий концентрации плазмы $\delta\varepsilon^* = -\frac{2}{Q}$. При монотонном уменьшении концентрации плазмы на временах $t < t^*$ работает стандартная для СВЧ-зонда методика измерения [1], при $t > t^*$ амплитудно-фазовый метод. Временной ход концентрации на временах $t > t^*$ восстанавливался в соответствии с (13), результат обработки показан на рис. 2.11 сплошной линией. 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 в диапазоне концентраций $2 \cdot 10^7 - 6 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ совпали с точностью не хуже 5% с результатами, полученными с помощью низкочастотного СВЧ-зонда. Концентрация плазмы в диапазоне $7 \cdot 10^8 - 7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ измерена СВЧ-зондом с $f_0 = 2034 \text{ МГц}$ стандартной методикой.

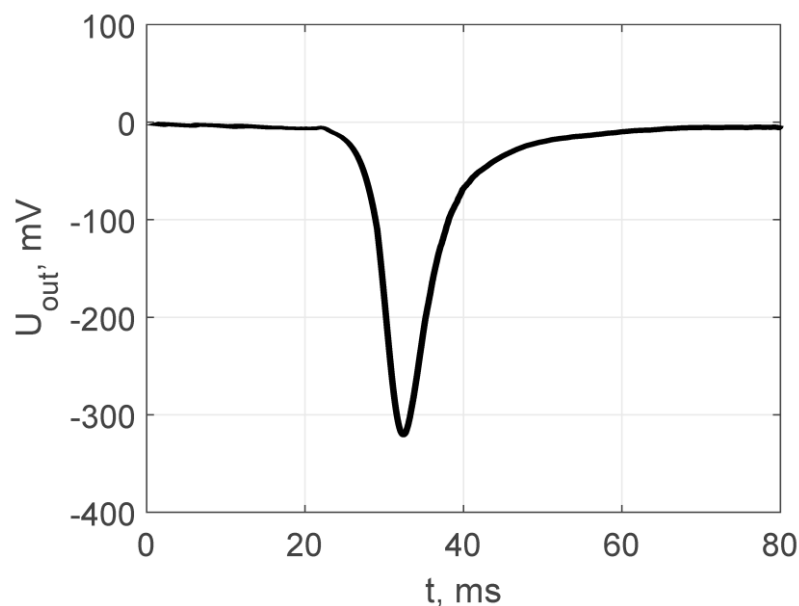


Рис. 2.10 Осциллограмма выходного сигнала в схеме, реализующей амплитудно-фазовую методику измерения концентрации плазмы с помощью СВЧ-зонда в режиме распадающейся плазмы. Собственная резонансная частота СВЧ-зонда $\omega_0 / 2\pi = 2034$ МГц

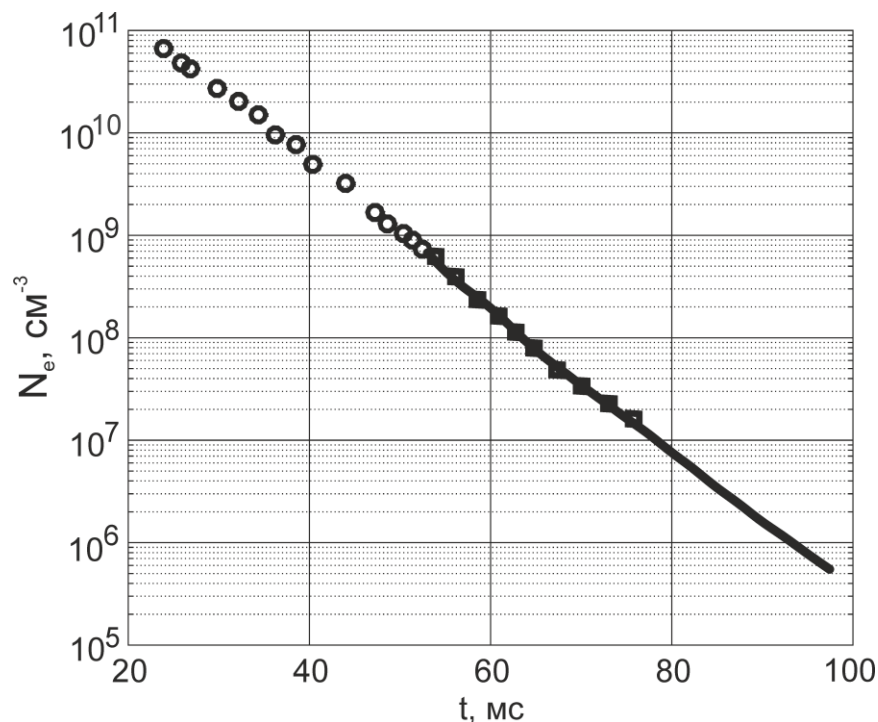


Рис. 2.11 Временная зависимость концентрации плазмы после окончания работы плазмозадающего источника: сплошная кривая – измерения выполнены малогабаритным СВЧ-зондом ($f_0 = 2034$ МГц) с применением амплитудно-фазовой методики; \circ - измерения выполнены малогабаритным СВЧ-зондом ($f_0 = 2034$ МГц) с использованием стандартной методикой; \square - измерения выполнены низкочастотным СВЧ-зондом ($f_0 = 420$ МГц) с использованием стандартной методикой

Как видно из рис. 2.11 все измеренные значения концентрации с хорошей точностью ложатся на линейную зависимость $\ln(N_e(t))$, определяемую неизменным характером диффузионного распада плазмы на стенде «Ионосфера». Характерное время τ_N спада концентрации, в соответствии с рис. 2.11, порядка 8 мс. Это значение хорошо согласуется с теоретической оценкой. Действительно для слабоионизованной замагниченной плазмы на экспериментальном стенде с хорошей степенью точности реализуется режим продольной амбиполярной диффузии с коэффициентом $D = 2 \frac{T_e + T_i}{M v_{im}}$,

где T_e и T_i - температуры электронов и ионов, соответственно, M - масса иона аргона, v_{im} - частота столкновений ион-молекула. Поскольку $\tau_N \gg \tau_T$, можно считать, что диффузия

происходит при постоянной температуре, причем $T_e = T_i$. Если $L = \left[\left(\frac{2.4}{L_{\perp}} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{L_{\parallel}} \right)^2 \right]^{-0.5}$ -

характерная длина диффузии, L_{\perp}, L_{\parallel} - поперечный и продольный размер установки, то $\tau = \frac{L^2}{D}$. При $L_{\perp} = 1\text{м}$, $L_{\parallel} = 1.2\text{м}$, $T_e = T_i = 0.5\text{эВ}$, $v_{em} \sim 4 \cdot 10^8 \text{с}^{-1}$ получаем, что $\tau_N \sim 10\text{мс}$.

При тестировании методики не обнаружено изменение экспоненциального спада концентрации плазмы при низких значениях N_e , обусловленное влиянием двойного слоя. Вероятно, это связано с высокой скоростью диффузии на экспериментальной установке и наличием слабого внешнего магнитного поля ($\omega_{he} \ll \omega$).

Стоит отметить, что в случае распадающейся плазмы с помощью традиционной методики по сдвигу максимума резонансной удается измерить одно значение концентрации при одном распаде плазмы. Предложенный амплитудно-фазовый метод позволяет фиксировать непрерывную зависимость концентрации от времени в динамическом диапазоне от $5 \cdot 10^5 \text{см}^{-3}$ до $7 \cdot 10^8 \text{см}^{-3}$.

Амплитудно-фазовая методика измерений совместно с традиционной [1] существенно расширяет диагностические возможности СВЧ-зонда. Для демонстрации этого проведены измерения радиального распределения концентрации плазмы на стенде «Ионосфера» на 50мс от момента выключения плазмосоздающего генератора. Результаты измерений приведены на рис. 2.12. Стандартная методика на таких временах позволяет проводить измерения концентрации плазмы на расстояниях $r < 15\text{см}$ от центра камеры, амплитудно-фазовый метод расширяет пространственный диапазон практически в два раза, то есть до $r \sim 30\text{см}$.

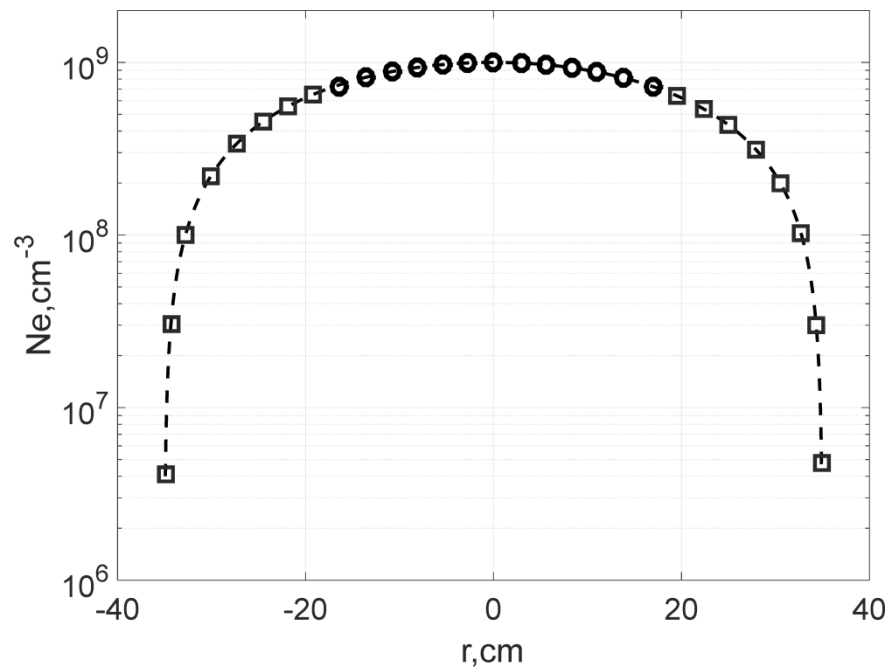


Рис. 2.12 Радиальное распределение концентрации плазмы на стенде «ИОНОСФЕРА» в момент времени $t=50\text{мс}$ после пробоя плазмы. Измерения проводились малогабаритным СВЧ-зондом ($f_0=2034\text{МГц}$); ○ - измерения выполнены с использованием стандартной методикой; □ - измерения выполнены при помощи амплитудно-фазового метода.

Следует отметить, что масштаб неоднородности плотности плазмы заметно больше размеров низкочастотного зонда с $f_0 = 420 \text{ МГц}$, что оправдывает его применение в качестве независимой оценки измерения концентрации плазмы. Переход к малогабаритному зонду с $f_0 = 2034 \text{ МГц}$ и длиной 3.75 см позволил уменьшить пространственное разрешение датчика до 5 см по сравнению с зондом с $f_0 = 420 \text{ МГц}$.

2.1 Резонансный датчик давления газа на отрезке коаксиальной линии

Многие современные технологические процессы проходят в вакууме и требуют контроля давления в широком диапазоне. В силу отсутствия физического явления, которое можно было бы эффективно использовать в вакуумметрах для измерения всего требуемого диапазона давлений от атмосферы до глубокого вакуума, на различных диапазонах давления используются вакуумные датчики, основанные на разных принципах действия.

Существует множество взаимодополняющих методов измерения вакуума. Все эти методы делятся на две группы – абсолютные и относительные (косвенные). К первому типу относятся, прежде всего, деформационные вакуумметры, непосредственно измеряющие реальную силу давления газа на чувствительный элемент датчика (пластину, мембрану, сильфон). Для увеличения чувствительности механического вакуумметра упругий элемент соединяют с электрическим преобразователем – емкостным или индуктивным. Преимущество данного типа вакуумметров в том, что их показания не зависят от сорта газа, а к недостаткам относится узкий диапазон измеряемых значений для каждого датчика и невозможность измерять быстрые динамические процессы в газах.

Вакуумметры с косвенным типом измерения, фиксируют физические параметры, связанные с давлением газа известными закономерностями. Самыми распространенными среди них для измерения среднего вакуума, в частности для контроля предварительного разрежения в вакуумных системах являются тепловые вакуумные датчики (ПМТ-2, ПМТ-4М, ПМТ-6-3). Действие тепловых вакуумметров основано на зависимости теплопроводности разреженных газов от концентрации газа a , следовательно, от давления. Основным элементом теплового преобразователя давления является нагретый пропусканием тока проводник (нагреватель), по изменению температуры которого, либо по изменению электрической мощности, расходуемой для поддержания неизменной температуры, судят о давлении. По способу контроля температуры тепловые вакуумметры подразделяют на термпарные, в которых мерой давлений служит термо-ЭДС термпары, соединенной с нагревателем, и на вакуумметры сопротивления, где используется температурная зависимость электрического сопротивления нагревателя. Показания тепловых вакуумметров зависят от рода газа. Эта зависимость особенно резко проявляется при давлениях выше 0.7 Торр. Колебания окружающей температуры также искажают результаты измерений, поскольку теплопроводность газа зависит от его температуры. Поэтому типовые градуировочные характеристики в паспорте таких устройств приводятся для внешней температуры + 20°C. Относительная погрешность измерений давления

тепловыми датчиками порядка 30-50% от измеряемой величины. Инерционность показаний, связанная с тепловой инерцией нити, достигает нескольких секунд.

Для измерения давления ниже 10^{-3} Торр используют ионизационные вакуумметры. В основе принципа действия электронных ионизационных вакуумметров лежит прямая зависимость между давлением остаточных газов и ионным током, образовавшимся в результате ионизации молекул газа термоэлектронами. Если в разреженном газе создать поток электронов, то произойдет ионизация газа, и между двумя электродами, к которым подведено электрическое напряжение, возникнет ионный ток. Сила ионного тока при прочих равных условиях пропорциональна плотности газа, а, следовательно, при определенной температуре пропорциональна его давлению. Так как вероятность ионизации молекулы газа мало зависит от скорости ее теплового движения, более правильно считать, что манометр измеряет не давление, а концентрацию внутри прибора. Прибор, работающий по этому принципу, состоит из датчика, соединенного с вакуумной системой, и отдельного блока электрического питания и измерения. Показания прибора зависят от рода газа, и требуется предварительная градуировка по каждому газу. Также ионизационные преобразователи не предназначены для измерения среднего вакуума (выше 10^{-3} Торр).

Создание нового высокоточного метода измерения давления в широком диапазоне значений с высоким временным разрешением является актуальной задачей для контроля давления в вакуумной камере. Данная задача может быть решена путем измерения диэлектрической проницаемости газов, однозначно связанной при определенной температуре с его давлением.

Для измерения диэлектрической проницаемости газов, мало отличающейся от единицы и обладающей малыми потерями, необходимы точные методы измерения таких малых величин проницаемости. Прямые способы определения проницаемости, основанные на измерении емкости с образцом и без образца, не обеспечивают приемлемую точность. Для этих целей применяются резонансные методы, наиболее чувствительные к вариациям диэлектрической проницаемости газов. Технически наиболее прост для реализации резонансный метод биений [32-34], суть которого состоит в измерении разности частот двух генераторов, один из которых подключен к конденсатору с газом, второй без газа. Однако, точность данного метода не превышает 10%. Чувствительность волноводного метода, основанного на смещении узла стоячей волны при введении исследуемого газа в волновод [35], ограничена длиной измерительной ячейки и стабильностью генератора. Несмотря на сравнительно низкую чувствительность, волноводные методы часто применяются в радиоспектроскопии [35] за счет широкого

спектра используемых частот. Наибольшей чувствительностью обладают оптические методы в миллиметровом диапазоне частот. Основная идея этих методов состоит в наблюдении проходящих через образец электромагнитных волн, собранных в пучки с помощью подходящих направляющих устройств. Основные трудности данных методов сопряжены с дифракционными явлениями в коротковолновой области, фокусировкой зондирующих пучков, повышенным требованием к качеству обработки измерительных поверхностей.

Наиболее удобными для практического применения способами измерения проницаемости газов являются резонансные методы с использованием отрезков длинных линий передач. Для этого предлагается использовать полуволновый коаксиальный СВЧ-резонатор. Полуволновый резонатор, закороченный на обоих концах, имеет вдвое большую длину, нежели четвертьволновый на той же резонансной частоте, однако в силу конструктивных особенностей полуволновый резонатор более устойчив к механическим колебаниям, что существенно при исследовании нестационарных процессов в среде, связанных, например, с флуктуациями плотности газа.

2.2.1 Описание измерительной системы

Диагностический датчик представляет собой полый резонатор в виде полуволнового отрезка коаксиальной линии, закороченной на обоих концах (рис. 2.13). Возбуждение резонатора и приём его отклика осуществляются посредством петель магнитной связи, размещённых в резонаторе вблизи короткозамкнутого конца. Длина резонатора $l=15$ см, диаметры внешнего и внутреннего проводников, соответственно, 20 мм и 5 мм. Собственная резонансная частота измерительной системы в вакууме $f_0=1031.6$ МГц, добротность $Q_0=452$. Вдоль внешнего проводника коаксиальной линии, образующей резонатор, выполнено две диаметрально симметричных прорези шириной 2 мм посредством которых внутренний объём резонатора сообщается с внешним газовым пространством. Наличие газовой среды в объёме резонатора приводит к смещению резонансной кривой (изменению резонансной частоты), причём это смещение определяется диэлектрической проницаемостью газа, зависящей от давления. Динамические параметры измерительной системы определяются добротностью резонатора: характерный временной масштаб T изменения давления (диэлектрической проницаемости газа), регистрируемый датчиком, должен быть больше характерного времени затухания колебаний в резонаторе $Q_0/(2\pi f_0) \sim 10^{-7}$ с.

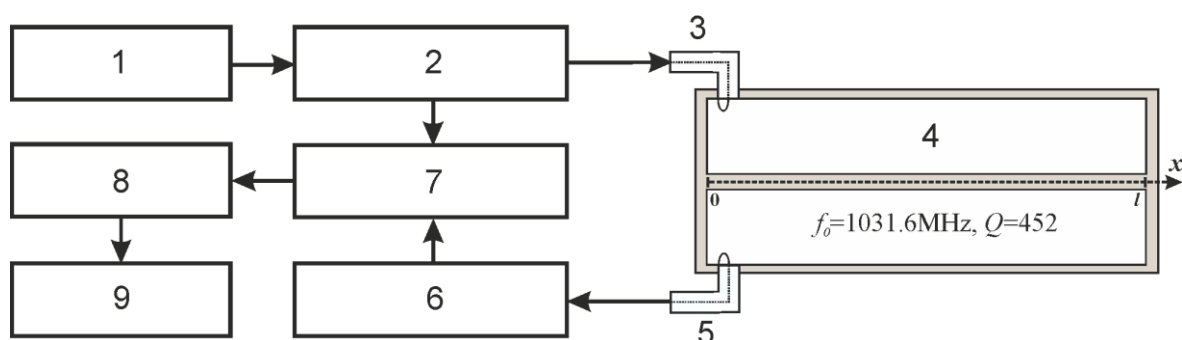


Рис. 2.13 Блок-схема включения резонансного датчика для измерения давления газа: 1 – СВЧ-генератор, 2 – делитель мощности, 3 – возбуждающая линия, 4 – резонатор, 5 – приемная линия, 6 – линия переменной длины, 7 – фазовый детектор, 8 – усилитель, 9 – АЦП, компьютер.

Блок-схема включения резонансного датчика представлена на рис. 2.13. Для регистрации малых вариаций резонансной частоты диагностической системы в зависимости от давления газа был использован метод измерения фазового сдвига, развитый в предыдущем разделе для диагностики концентрации плазмы. Применительно к диагностике давления газа суть амплитудно-фазового метода состоит в измерении набега фазы сигнала, прошедшего через резонатор с газом и пропорционального диэлектрической проницаемости среды. Амплитуда сигнала генератора $U_G = 2.5$ В, фазовый детектор был выполнен на микросхеме ADE-R2ASKLH+. Наличие газовой среды в объеме резонатора приводило к смещению резонансной частоты датчика на величину Δf относительно f_0 и появлению дополнительного набега фазы $\Delta\varphi$ прошедшего через него сигнала, причем

$$U_{out} = k U_{res} \sin(\Delta\varphi), \quad (2.15)$$

где, k - суммарный коэффициент ослабления в измерительной системе. При практическом использовании датчика необходимо учитывать температуру окружающей среды, вариации которой могут приводить к изменению его собственной резонансной частоты. В данной работе тестирование измерительной системы проводилось при температуре 22°C.

Для полуволнового резонатора, заполненного газом с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 1 + \Delta\varepsilon$, $\Delta\varepsilon \ll 1$ выражения для амплитуды I_3 и набега фазы $\Delta\varphi$ прошедшего через резонатор сигнала в соответствии с (1.15) имеют вид:

$$I_3 = \frac{I_0}{\sqrt{Q_0^2(2\Delta\omega/\omega_0 + \Delta\varepsilon)^2 / 4 + 1}} \quad (2.16)$$

$$\operatorname{tg}(\Delta\varphi) = Q_0(2\Delta\omega/\omega_0 + \Delta\varepsilon)/2 \quad (2.17)$$

где Q_0 - собственная добротность резонатора.

Как видно из (2.16), сдвиг резонансной частоты $\Delta\omega$ датчика определяется диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 1 + \Delta\varepsilon$ газовой среды, находящейся в его внутреннем объеме:

$$\Delta\omega = -0.5\omega_0\Delta\varepsilon \quad (2.18)$$

При изменении температуры резонатора, вследствие температурного расширения изменяется его длина l и собственная резонансная частота ω_0 . Относительное изменение длины l при увеличении температуры материала на 1°K определяется коэффициентом линейного теплового расширения α :

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}. \quad (2.19)$$

Учитывая (9) и (17) нетрудно получить зависимость собственной резонансной частоты датчика от температуры вследствие температурного расширения:

$$\omega_0(T) = \omega_0(T_0) \left(1 - \alpha \frac{T - T_0}{T_0} \right) \quad (2.20)$$

где $\omega_0(T_0)$ - собственная резонансная частота датчика при температуре T_0 .

Согласно [36, 37], диэлектрическая проницаемость газовой среды ε связана с концентрацией частиц n линейной зависимостью $\varepsilon - 1 = \beta n$, где коэффициент пропорциональности β определяется сортом газа. С учетом уравнения состояния идеального газа $P = nkT$ (k - постоянная Больцмана, P - давление газа, T - температура газа) получаем, что

$$\varepsilon - 1 = \beta \frac{P}{kT} \quad (2.21)$$

Таким образом, в соответствии с (2.18) и (2.21), при известной температуре газа, его давление P однозначно определяется изменением резонансной частоты системы $\Delta\omega$.

Получим выражение для U_{out} , соответствующее усиленному в k раз сигналу на выходе фазового детектора.

Поскольку в измерительной схеме к датчику подводится сигнал, соответствующий собственной резонансной частоте ($\delta\omega = 0$), выражения и фазы прошедшего через резонатор сигнала, согласно (2.16) и (2.17), записываются в следующем виде:

$$\Delta\varphi = Q_0\Delta\varepsilon/2 \quad (2.22)$$

$$I_3 = I_0 \left(1 + \frac{1}{4} Q_0^2 \Delta\varepsilon^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.23)$$

При помощи (2.21) и (2.22), в предположении малости величины $Q_0\Delta\varepsilon$ ($Q_0\Delta\varepsilon \ll 1$), выражение (2.15), соответствующее усиленному сигналу с фазового детектора, переписывается следующим образом:

$$U_{out} = kU_0 \left(1 + \frac{1}{4} Q_0^2 \Delta\varepsilon^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \sin(Q_0\Delta\varepsilon/2) \approx \frac{kU_0Q_0\Delta\varepsilon}{2} \quad (2.24)$$

Таким образом, найдена связь выходного сигнала измерительной системы с диэлектрической проницаемостью газовой среды в объеме резонатора. С учетом (2.18), из (2.24) можно получить выражение, связывающее амплитуду выходного сигнала U_{out} со сдвигом резонансной частоты $\Delta f = \Delta\omega/(2\pi)$:

$$U_{out} \approx \frac{kU_0Q_0}{f_0} \Delta f \quad (2.25)$$

2.2.2 Экспериментальные результаты

Тестирование измерительной системы проводилось в вакуумной камере объемом 1 м^3 . Откачка вакуумной камеры осуществлялась с помощью форвакуумного насоса НВР-16Д до давления $2 \cdot 10^{-2}$ Торр. Такое давление остаточного газа не оказывало влияние на резонансную частоту датчика, так как его величина значительно ниже предела чувствительности измерительной системы. Датчик располагался в центре камеры. Возбуждающая и приемная линии датчика заводились в камеру через вакуумные коаксиальные вводы. Температура установки, газовой среды в ее объеме и резонансного датчика составляли 22°C .

На рис. 2.14 представлена амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики резонатора в окрестности собственной резонансной частоты, полученные с помощью векторного анализатора Agilent Technologies E5071C при остаточном давлении в вакуумной камере $2 \cdot 10^{-2}$ Торр.

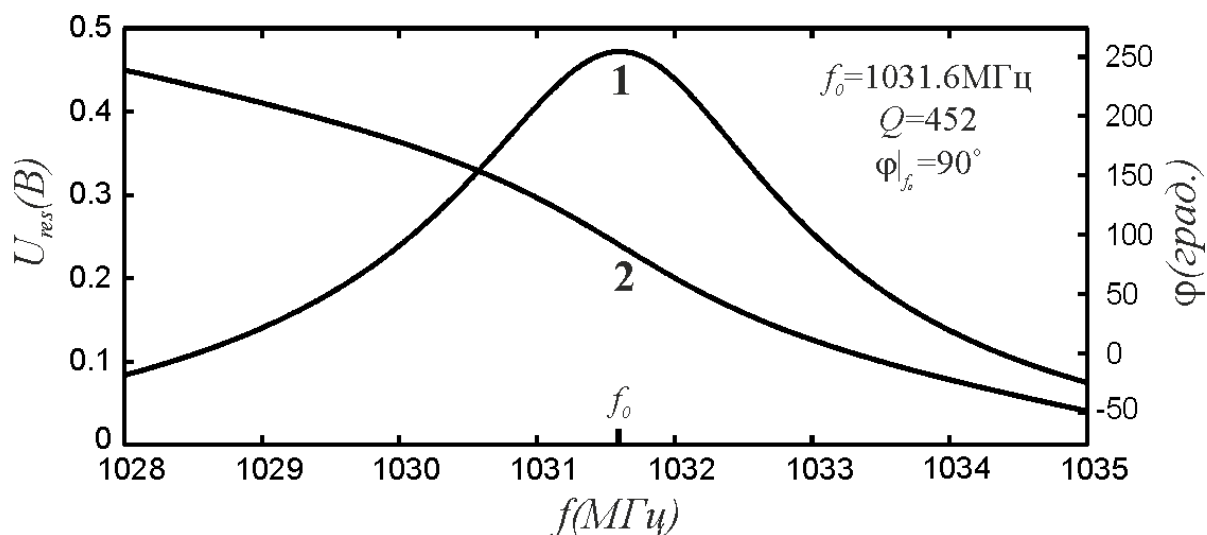


Рис. 2.14 Амплитудно-частотная (1) и фазочастотная (2) характеристики резонансного датчика при температуре 22°C и остаточном давлении в вакуумной камере $2 \cdot 10^{-2}$ Торр. Собственная резонансная частота датчика $f_0 = 1031.6$ МГц, добротность $Q = 452$. С помощью линии переменной длины на частоте f_0 устанавливалась разность фаз $\varphi_0 = 90^\circ$ между входящим и прошедшим через резонатор сигналами.

На рис. 2.15 представлена частотная зависимость выходного сигнала измерительной системы (усиленный сигнал с фазового детектора). Точками отмечены экспериментальные значения, полученные при остаточном давлении в вакуумной камере $2 \cdot 10^{-2}$ Торр путем изменения частоты генератора. Сплошная линия – теоретическая зависимость (2.25): при $k = 23.7$ dB, $U_0 = U_r / 2 = 1.25$ В, $Q = 452$ $U_{out}(B) = 1.7 \cdot 10^{-5}(f - f_0)$. Как видно из рис. 2.15 теоретическая зависимость (2.25) хорошо согласуется с экспериментальными данными. Изменение сигнала U_{out} на 1 мВ соответствует изменению резонансной частоты датчика на 170 Гц.

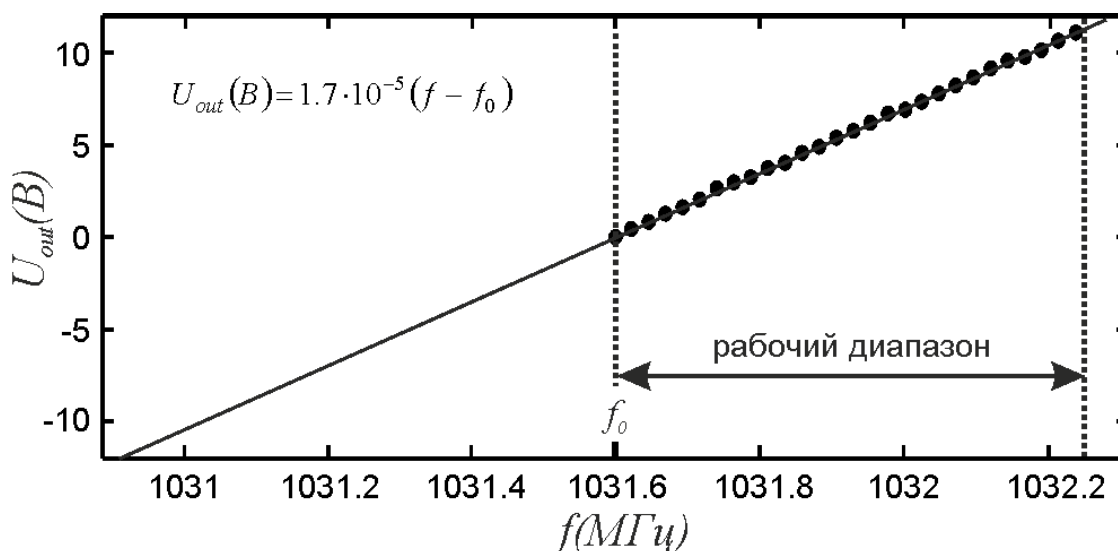


Рис. 2.16. Частотная зависимость выходного сигнала измерительной системы. Сплошная линия рассчитана с помощью выражения (2.25) по данным амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристики резонатора. Точки соответствуют экспериментальным значениям, полученным при остаточном давлении газа в вакуумной камере $2 \cdot 10^{-2}$ Торр и температуре 22°C путем изменения частоты генератора.

Калибровка измерительной системы осуществлялась следующим образом. При достижении в камере давления $2 \cdot 10^{-2}$ Торр отключалась вакуумная откачка. Далее в вакуумный объем с помощью игольчатого натекавателя напускался рабочий газ: аргон, гелий, воздух влажностью 23%, воздух влажностью менее 1%. Для удаления из воздуха влаги использовался силикагель. Контроль давления в диапазоне $2 \cdot 10^{-2} - 10$ Торр осуществлялся посредством датчика Pfeiffer-PKR251, в диапазоне 10 Торр – 1 атм с помощью вакуумметра ДВ 05100ДВ, избыточное давление в пределах 1 – 2 атм измерялось манометром ДА 05160. В процессе напуска регистрировалось изменение амплитуды сигнала с диагностической системы в зависимости от давления рабочего газа. Результаты измерений представлены на рис. 2.16. Экспериментальные данные для воздуха влажностью менее 1% совпадают с результатами для аргона.

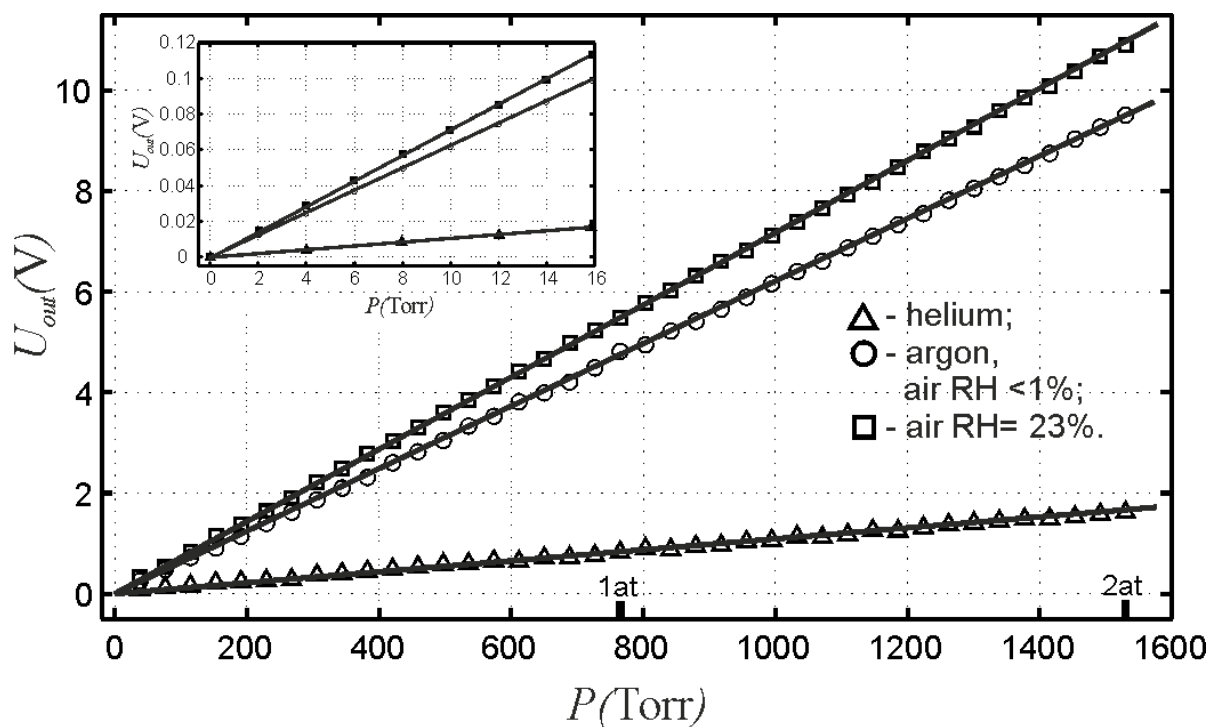


Рис. 2.17. Зависимость амплитуды сигнала с диагностической системы от давления рабочего газа для аргона, гелия и воздуха влажностью 23% при температуре 22°C.

Калибровочные кривые показывают линейную зависимость выходного сигнала с измерительной системы от давления газа P . При уровне шумовой составляющей сигнала U_{out} порядка 0.5 мВ, минимальное давление, регистрируемое диагностической системы, а так же точность измерения давления порядка 0.1 Торр для аргона и воздуха, для гелия – около 0.6 Торр. Измерения проводились до 2атм.

С помощью данной измерительной системы можно определять влажной воздуха по измерениям диэлектрической проницаемости влажного и сухого воздуха, например, по номограммам относительной диэлектрической проницаемости в зависимости от температуры и влажности изображены [38]

На основе калибровочных данных были рассчитаны диэлектрические проницаемости используемых газов при давлении 1 атм. Использовалась зависимость $U_{out} (В) \approx 8.8 \cdot 10^3 (\epsilon - 1)$, соответствующая выражению (23). Было получено, что $\epsilon_{Ar} = 1.0005473$, $\epsilon_{He} = 1.0000721$, для воздуха влажностью менее 1% $\epsilon_{Возд} = 1.0005512$. Отклонения величины $\epsilon - 1$ от табличных данных [36, 37] составляют порядка 5-10%.

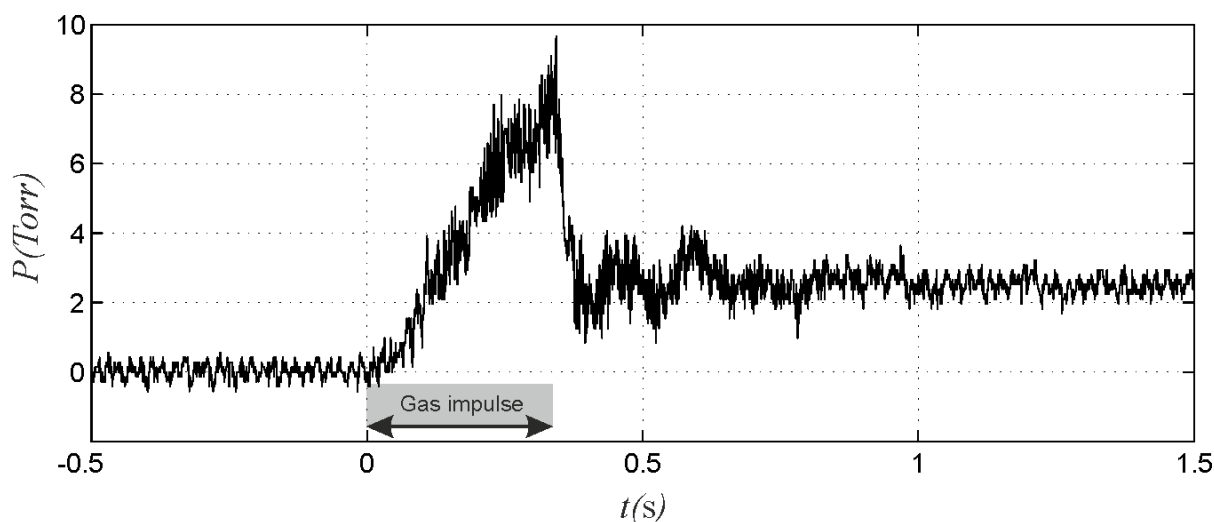


Рис. 2.18 Осциллограмма давления в центре вакуумной камеры при импульсном напуске газа: длительность напуска 0.33 с, начальное давление в камере – $2 \cdot 10^{-1}$ Торр, конечное – 2.5 Торр, рабочий газ – воздух влажностью 23% при температуре 22°C.

Для демонстрации возможности измерительной системы по диагностике профиля давления газовых пучков, проведены предварительные эксперименты по импульсному напуску газа в вакуумную камеру. Импульсный напуск газа осуществлялся с помощью электромагнитного клапана КВУМ-16Л. В качестве рабочего газа использовался воздух влажностью 23%, давление на входе клапана составляло 1 атм. После открытия клапана газ в вакуумную камеру поступал через металлическую трубку с внутренним диаметром 12 мм, вваренную в корпус камеры напротив датчика. На 5. представлен профиль давления в центре инжектируемого газового пучка длительностью 0.33 с, измеренный с помощью резонансной диагностической системы. Начальное давление в камере составляло 10^{-1} Торр, конечное – 2.5 Торр. После закрытия клапана на осциллограмме наблюдались затухающие колебания давления, связанные с переотражением газового импульса от стенок камеры.

2.3 Выводы

В данной главе диссертации развита амплитудно-фазовая методика определения малых вариаций диэлектрической проницаемости однородных сред на примере измерения концентрации плазмы и давления газа. В рамках данной методики измерения проводятся на фиксированной частоте, соответствующей резонансной частоте СВЧ-зонда 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 слабозамагниченной плазмы развитая методика применима в случае, когда добротность резонатора СВЧ-зонда не зависит от наличия плазмы. В работе рассчитана общая добротность измерительной системы, складывающаяся из всех видов потерь энергии в резонаторе. Показано, что наибольший вклад в добротность вносит минимальная добротность, определяемая связью резонатора с возбуждающей и приемной линией. Экспериментальная апробация методики проводилась на примере СВЧ-зонда на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии с собственной резонансной частотой $f_0 = 2034 \text{ МГц}$ и добротностью порядка 150. В качестве независимого метода использовался классический способ измерения концентрации по сдвигу максимума резонансной кривой низкочастотного зонда с $f_0 = 420 \text{ МГц}$ больших размеров. Продемонстрировано, 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 $f_0 = 2034 \text{ МГц}$ стандартной методикой по сдвигу максимума резонансной кривой. 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.

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 50мс от момента выключения плазмоздающего генератора. Стандартная методика на таких временах позволяет проводить измерения концентрации плазмы на расстояниях менее 15см от центра камеры, амплитудно-фазовый метод расширяет пространственный диапазон более чем в два раза.

При соответствующей модификации, резонансный датчик может быть использован на плазмохимических установках, где необходим контроль концентрации плазмы. Возможности измерительной системы не ограничиваются определением стационарного значения плотности плазмы. Высокое временное разрешение измерительной системы порядка 10^{-8} с, определяемое добротностью резонатора, позволяет осуществлять диагностику малых флуктуаций концентрации плазмы с относительным возмущением плотности $\delta n/n \sim 10^{-5}$.

Применительно к диагностике давления газа в диапазоне от 0.1 Торр до 1 атм 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. Смещение резонансной частоты измерительной системы относительно значения при низком вакууме ($P \leq 10^{-2}$ Торр) определяется диэлектрической проницаемостью газа и, следовательно, концентрацией его молекул. При известной температуре газовой среды по результатам измерений однозначно определяется ее давление. Получены калибровочные кривые для аргона, гелия, воздуха (при температуре 22°C) связывающие амплитуды выходного сигнала СВЧ-датчика с давлением исследуемых газов. Экспериментально установлено, что минимальное давление, регистрируемое датчиком, а также его чувствительность около 0.6 Торр для гелия и 0.1 Торр для аргона и воздуха. Верхняя граница давления, до которой проводилось тестирование датчика, равнялось 1 атм. При давлении 1 атм. были рассчитаны диэлектрические проницаемости ϵ исследуемых газов. Получено, что отклонение величины $\epsilon - 1$ от табличных данных составляет 5-10%.

По рабочему диапазону давлений и точности измерений резонансный СВЧ-датчик давления (при известной температуре) превосходит тепловые вакуумные лампы.

При практическом использовании измерительной системы необходимо в его корпус устанавливать датчик температуры, поскольку вследствие температурного расширения материала резонатора изменяется его собственная резонансная частота f_0 . Коррекция f_0 в зависимости от температуры осуществляется с помощью рассчитанной теоретической зависимости.

Высокое временное разрешение измерительной системы (порядка 10^{-7} с) позволяет осуществлять диагностику нестационарных газовых процессов. Для демонстрации возможностей разработанного датчика измерена динамика импульсного напуска газа в вакуумную камеру.

Глава 3 НЕИНВАЗИВНАЯ БЛИЖНЕПОЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

В диагностике различных заболеваний важная роль принадлежит определению размеров, формы и структуры патологических изменений в биологических тканях. С этой целью традиционно используются рентгенологические и ультразвуковые методы исследования. Сегодня методы компьютерной томографии, особенно с применением контрастных веществ, являются фундаментом диагностики множества болезней, сопровождающихся морфологическими изменениями пораженного органа или его части. Однако, с учетом действия на организм проникающей радиации, эти методы не могут быть отнесены в полной мере к неинвазивным. Ультразвуковое обследование (абсолютно безопасный, быстрый и информативный метод предварительной диагностики и контроля результатов лечения) в ряде случаев не позволяет установить диагноз и выявить патологические процессы. В частности, недостаточно хорошая визуализация имеет место у больных с избыточной массой тела. Кроме этого, результаты ультразвукового исследования существенно зависят от квалификации врача.

Современным и надёжным методом диагностики является магнитно-резонансная томография (МРТ), которая в настоящее время уникальна и практически не имеет аналогов при исследованиях заболеваний центральной нервной системы, позвоночника, мышечно-суставной системы. В последнее десятилетие достигнуты значительные успехи в области оптической когерентной томографии (ОКТ), однако малая глубина проникновения оптического излучения существенно сужает область ее применения.

Перечисленные методы визуализации биологических тканей отличаются друг от друга, в первую очередь, физической природой зондирующего излучения. Для компьютерной и оптической когерентной томографии это соответственно рентгеновское и оптическое излучение; УЗИ использует ультразвуковые волны; магниторезонансная томография основана на измерении электромагнитного отклика ядер атомов водорода на возбуждение их определённой комбинацией электромагнитных волн в постоянном магнитном поле высокой напряжённости. Наблюдаемая структура определяется свойствами тканей рассеивать и поглощать соответственно рентгеновское, оптическое и ультразвуковое излучение; МРТ проводит визуализацию на основе насыщенности тканей организма водородом и изменения их магнитных свойств в зависимости от окружения разными атомами и молекулами. У каждого метода своя область применения, и ни один из них не обладает универсальными возможностями.

В медицине имеется класс заболеваний, ранняя диагностика которых не может быть выполнена с помощью существующих методов визуализации биологических тканей из-за слабого контраста. В первую очередь, к этим заболеваниям стоит отнести онкологические новообразования, в частности, диффузных новообразований щитовидной железы, рак молочной железы у женщин, опухолевый процесс при жировой инвазии, злокачественные новообразования кожи с определением уровня инвазии. Также актуальным является диагностика рубцовых процессов в реконструктивной и пластической хирургии, оценки жизнеспособности тканей при травмах и ожогах и т.д.

В последние годы во всем мире отмечается стремительный рост заболеваемости злокачественными новообразованиями кожи, каждый год регистрируется до 3 миллионов новых случаев. По распространенности рак кожи среди всех злокачественных новообразований человека занимает третье место, уступая раку желудка и легкого. Прирост заболеваемости за последние десять лет достиг уровня 44%. Средний возраст пациентов колеблется от 45 до 70 лет. В развитии онкологических заболеваний кожи играет роль множество факторов: ионизирующее излучение, ретровирусы, иммуносупрессии, химические канцерогены, избыточная инсоляция.

Опухоли кожи могут носить как доброкачественный, так и злокачественный характер и произрастать из многослойного плоского эпителия (папиллома, базалиома, плоскоклеточный рак), либо из меланинообразующей ткани (невус и меланома). В ряде случаев злокачественные опухоли малигнизируются из доброкачественных, на первый взгляд безобидных, новообразований. Своевременность диагностики новообразований кожи, особенно на ранних стадиях, все еще нельзя признать удовлетворительной, хотя доля больных, выявленных в запущенных стадиях заболевания, постепенно уменьшается. Диагностика опухолей и опухолеподобных поражений кожи базируется на данных клинической картины, полученной при визуальном наружном осмотре пациента, инструментальных методов исследования [39, 40]. К сожалению, точность клинической диагностики у врачей, не являющихся онкологами, составляет около 37%, [41]. Статистические и клинические наблюдения свидетельствуют, что достаточно часто больного с ошибочным диагнозом длительное время наблюдают хирург, дерматолог, косметолог, при этом пациент получает неадекватное лечение, чем нередко стимулируется распространение злокачественного процесса [42]. Для повышения точности диагностики необходима биопсия (прижизненное исследование тканей), однако проведение биопсии может спровоцировать агрессивное течение опухоли и диссеминацию опухолевого процесса.

Среди неинвазивных методов диагностики опухоли кожи наиболее распространенным является дерматоскопия. Одно только применение дерматоскопии по сравнению с осмотром невооруженным глазом позволяет увеличить чувствительность клинического обследования в плане выявления злокачественных новообразований и предраковых состояний с 54 до 79% [43]. С развитием цифровых технологий к диагностическим алгоритмам добавились методы компьютерной обработки изображений, полученных в ходе дерматоскопии (имидж-анализ) [44], а также различные методы повышения информативности собственно дерматоскопической картины — цифровая дерматоскопия.

Однако опираться только на результат компьютерного анализа при дифференциальной диагностике новообразований кожи нельзя, так как компьютерные программы не могут заменить собой опытного врача [45]. Резюмируя, можно сказать, что дерматоскопия не является универсальным средством диагностики и может только помочь врачу заподозрить злокачественный характер новообразования. Для верификации новообразований кожи, в частности меланомы, в настоящее время применяется также цитологическое исследование. Оно легко выполнимо, безболезненно, не вызывает осложнений. Однако даже среди опытных цитоморфологов ведущих онкологических учреждений страны частота ложноотрицательных результатов составляет 5-9 %. Кроме этого, метод имеет свои ограничения, показывая лишь характер клеток и не давая информации об инвазивном росте, что очень важно для диагностики, например, меланомы. Поэтому отрицательное заключение цитоморфолога о цитограмме опухоли еще не позволяет со стопроцентной вероятностью исключить диагноз рака кожи.

Использование ультразвукового исследования для дифференциальной диагностики опухолевых новообразований кожи на основании анализа изображений в режиме серой шкалы и характера васкуляризации в настоящее время представляется затруднительным [46]. Анализ уровня инвазии по Силвен-Кларку на основании ультразвуковой картины показывает, что в некоторых случаях удается дифференцировать, где находится дистальная граница опухоли: в эпидермисе (I уровень инвазии), дерме (II, III, IV) или подкожно-жировой клетчатке (V уровень). Однако, поскольку отчетливой разницы в изображении слоев дермы (поверхностной и глубокой зон сосочкового слоя, ретикулярного слоя) нет, то и определить принадлежность дистальной границы опухоли по этим слоям невозможно [46].

В последние годы предпринимаются активные попытки создания неинвазивных оптических методов диагностики злокачественных опухолей, позволяющих, не травмируя объект исследования, получить о нем необходимую достоверную информацию. К ним

относятся оптическая когерентная томография, флуоресцентная диагностика, инфракрасная спектроскопия, конфокальная лазерная микроскопия и т.д. [47-49]. В настоящее время указанные диагностики не используются в клинических условиях, в первую очередь, из-за неоднозначности интерпретации полученных данных, низкой специфичности и высокого процента ложноположительных результатов (от 32% до 70%).

Таким образом, имеющиеся данные свидетельствуют о целесообразности и актуальности разработки новых достоверных неинвазивных методов, позволяющих провести дифференциальную диагностику новообразований кожи, выявлять их на ранних стадиях, давать оценку риска и прогноз в каждом конкретном случае, которые применимы и воспроизводимы в ежедневной клинической практике, в том числе - в условиях амбулаторного приема пациентов. Для этой цели впервые использован метод резонансной ближнепольной СВЧ-диагностики, который позволяет визуализировать распределения диэлектрической проницаемости и проводимости биологических тканей в области новообразований кожи.

В настоящее время одним из перспективным и малоизученным методом диагностики биологических тканей является резонансная ближнепольная СВЧ-томография. Данный метод позволяет визуализировать распределения диэлектрической проницаемости и проводимости биологических тканей без разрушающего их непосредственного физического воздействия. Возможность применения резонансной ближнепольной СВЧ-томографии в диагностических целях обусловлена тем, что при формировании патологических изменений в биологических тканях происходит отчетливый сдвиг их электродинамических характеристик (диэлектрической проницаемости и проводимости). Преимуществом резонансной ближнепольной СВЧ-томографии является возможность исследования очагов заболевания, имеющих слабый контраст для традиционных способов ультразвукового, рентгеновского и оптического зондирования.

В рамках резонансной ближнепольной томографии подповерхностная структура комплексной диэлектрической проницаемости объекта восстанавливается по результатам измерения импедансов расположенных на ее поверхности электрически малых антенн, имеющих разный масштаб локализации зондирующего квазистатического электрического поля. Среда, находящаяся в ближнем поле зондирующей электрически малой антенны, оказывает влияние на ее импеданс. Если антенна включена в качестве нагрузки в резонансную систему, то по смещению резонансной частоты и изменению добротности можно судить об интегральных электродинамических характеристиках среды вблизи антенного устройства. При зондировании объекта антенной с глубиной зондирования h_1 ,

результаты измерений отражают интегральные свойства среды в приповерхностном слое толщиной порядка h_1 . Для антенны с глубиной зондирования $h_2 > h_1$ - интегральные свойства среды в приповерхностном слое уже большей толщиной h_2 и т.д. Варьируя точку измерения и зная отклики измерительных систем с разными глубинами зондирования можно восстановить глубинную структуру неоднородной среды.

Для экспериментальной реализации резонансной ближнеполевой СВЧ-диагностики биологических тканей первоочередной задачей является разработка резонансных измерительных систем, обладающих необходимой глубинной чувствительностью и разрешающей способностью, которые определяются типом зондирующего элемента (электрически малой антенны), его геометрическими размерами и параметрами резонатора. Конфигурация измерительных систем зависит от специфики диагностируемых объектов.

Данная глава диссертации посвящена разработке и апробации в натуральных условиях резонансных измерительных систем для неинвазивной диагностики биологических тканей на основе метода резонансного ближнеполюсного зондирования. Рассмотрены особенности конструкции изготовленных датчиков на основе высокочастотных резонаторов и описана методика глубинного подповерхностного зондирования (**раздел 3.1**). В качестве ближнеполюсной 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** изучен эффект «прижима», характеризующийся зависимостью показаний ближнеполюсного измерительного датчика от силы его давления на поверхность биообъекта. Найдены конструктивные решения, позволяющие свести к минимуму негативное влияние «прижима» путем использования зондирующего элемента в виде краевой емкости цилиндрического конденсатора, внешняя обкладка которого оканчивается металлическим фланцем. Далее представлены результаты экспериментального исследования метода ближнеполюсной СВЧ-зондирования подповерхностных диэлектрических неоднородностей системой резонансных датчиков с разными глубинами зондирования применительно к диагностике различных заболеваний (**раздел 3.3**). 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 ближнепольного СВЧ-зондирования на удаленных в ходе оперативного вмешательства тканях кожи, содержащих доброкачественные и злокачественные новообразования (родинка – пигментный невус, кератома, меланома). Показана информативность проведения резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования тканей в неинвазивном мониторинге их структуры при термической травме.

3.1 Резонансные измерительные системы для диагностики биологических тканей

Измерительная система для ближнепольной СВЧ-диагностики тканей кожи представляет собой СВЧ-резонатор в виде отрезка коаксиальной линии с фторопластовым заполнением, на одном конце которого находится нагрузка, включающая в себя зондирующую электрически малую антенну (измерительную емкость C), (рис. 3.1). На противоположном конце расположена магнитная рамка диаметром 0.5 см, для этого центральный проводник коаксиальной линии замыкается на экран, образуя индуктивную петлю. Возбуждение резонатора и прием его отклика осуществляется при помощи петель магнитной связи, расположенных вблизи магнитной рамки резонатора.

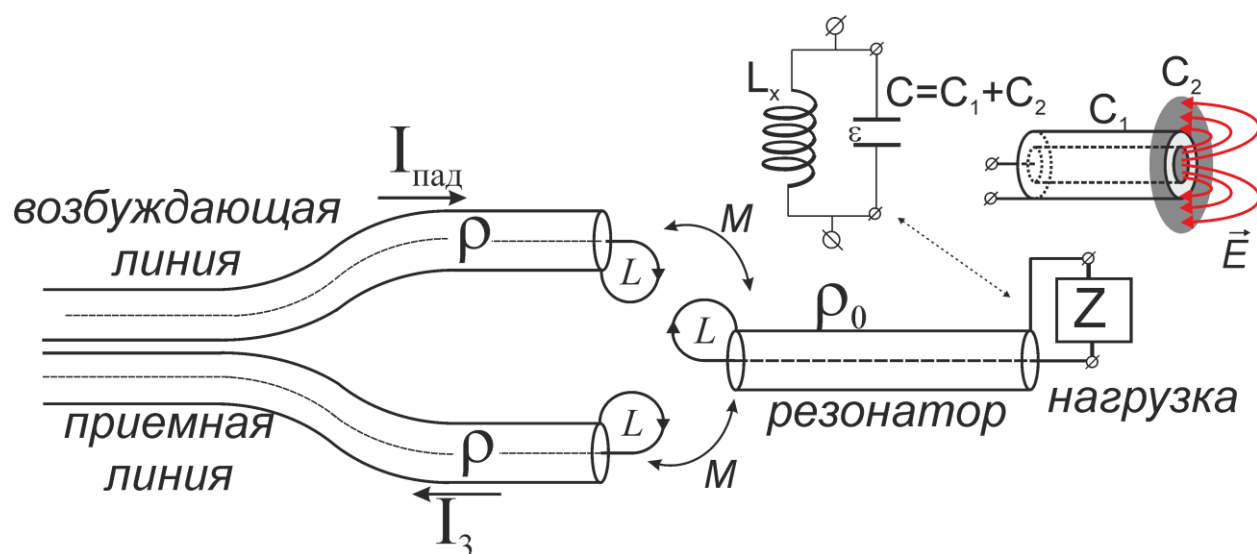


Рис. 3.1 Схема резонансной ближнепольной измерительной системы. Зондирование среды осуществляется краевой емкостью цилиндрического конденсатора. Квазистатическое электрическое поле E изображено схематически.

В качестве измерительной емкости C использовалась краевая емкость цилиндрического конденсатора с фторопластовым заполнением. Без учёта краевого

эффекта емкость цилиндрического конденсатора C_1 . Внешняя обкладка конденсатора оканчивается плоским металлическим фланцем (рис. 3.1). Торец цилиндрического конденсатора с плоским металлическим фланцем прикладывается к поверхности исследуемой среды. Глубина зондирования системы определяется расстоянием между внешней и внутренней обкладками конденсатора.

Коррекция резонансной характеристики системы для конкретной исследуемой среды осуществляется при помощи индуктивности L_x , включённой параллельно с C . Наличие вещества в области краевого квазистатического поля цилиндрической емкости приводит к изменению резонансной частоты и добротности системы.

Собственная резонансная частота измерительной системы выбираются в удобном для практического использования диапазоне 500-800 МГц, характерная добротность оказывается порядка 100-300. Внешний вид датчиков показан на рис. 3.2.

Схема включения диагностического датчика следующая. В качестве источника высокочастотных колебаний, подводимых к измерительным системам, используется свип-генератор в виде быстродействующего синтезатора частот на основе однопетлевой системы ФАПЧ. Это позволяет повысить точность установки и стабильность частоты до уровня, определяемого задающим кварцевым генератором (лучше 10^{-4}). Управление свип-генератором осуществляется программным образом от компьютера. В программе задаются начальные и конечные точки свипирования частоты в пределах диапазона частот 500-900МГц с разрешением 10 кГц, шаг перестройки частоты, кратный 10 кГц, а также время свипирования от 5 мс до 1 с. Свип-генератор имеет выход синхроимпульса для синхронизации внешних устройств. Импульс начинается синхронно с началом свипирования частоты и заканчивается с окончанием свипирования. Питание всех узлов свип-генератора производится от компьютера через шину USB. Потребляемая мощность не превышает 0,7 Вт.



Рис. 3.2 Фотография резонансных датчиков

Высокочастотный сигнал с зонда подается на систему детектирования и фильтрации сигнала. Выделенный резонансный пик поступает на систему оцифровки аналогового низкочастотного сигнала. Для передачи информации от измеряющего устройства к персональному компьютеру с целью дальнейшей обработки и определения параметров резонансной характеристики датчиков используется скоростной универсальный восьмиканальный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) USB3000.

3.2 Измерительная часть резонансных ближнепольных систем в виде краевой емкости цилиндрического конденсатора

Рассмотрим цилиндрический конденсатор в виде двух проводящих коаксиальных цилиндров радиусами r_1 и r_2 ($r_2 > r_1$). Внешняя обкладка конденсатора на одном из торцов оканчивается металлическим фланцем. Пространство между обкладками заполнено средой с диэлектрической проницаемостью ε_c . Распределение электрического поля в такой системе без учёта краевых эффектов на торцах цилиндров хорошо известно. В плоскости поперечного сечения конденсатора радиальные линии представляют собой силовые линии электрического поля, concentрические окружности – линии равного потенциала. Электрическое поле вне конденсатора равно нулю.

Если σ_c – поверхностная плотность заряда на центральном цилиндре ($\sigma_c = const$), разность потенциалов ΔU между обкладками и радиальное электрическое поле E_c выражаются в следующем виде:

$$\Delta U = \frac{4\pi\sigma_c r_1}{\varepsilon_c} \ln(r_2 / r_1), \quad (3.1)$$

$$E_c = \frac{1}{\ln(r_2 / r_1)} \frac{\Delta U}{r} \quad (3.2)$$

Ёмкость на единицу длины конденсатора определяется выражением:

$$C_c = \frac{\varepsilon_c}{2 \ln(r_2 / r_1)} \quad (3.3)$$

Учёт краевого эффекта приводит к изменению распределения поля в окрестности торца конденсатора. Во-первых, наличие электрического заряда на металлическом фланце и торце центрального проводника приводит к появлению электрического поля вне конденсатора. Во-вторых, внутри конденсатора наблюдается усиление поля вблизи торца

с увеличением поверхностной плотности заряда на внешней и центральной обкладке и появление аксиальной компоненты электрического поля. Дополнительная плотность заряда на торце конденсатора и внутри конденсатора определяют величину краевой емкости C_x . Для ее определения необходимо найти электрическое поле цилиндрического конденсатора, обусловленное краевым эффектом. Для того чтобы исключить взаимное влияние торцов конденсатора друг на друга будем предполагать, что длина цилиндрического конденсатора неограниченна. Именно такая модель наиболее приближена к случаю, когда зазор между обкладками существенно меньше их длины.

При разработке диагностических датчиков для изучения биологических тканей методом ближнепольного СВЧ-томографии необходимо учитывать их специфику и, в частности, эффект «прижима», обусловленный механическим контактом ближнепольной антенны (измерительной емкости) с поверхностью биообъекта.

Эффект «прижима» можно охарактеризовать как зависимость показаний датчика от силы давления его на поверхность изучаемого объекта. Данный факт имеет место при ближнепольных измерениях и оказывает негативное влияние на точность и повторяемость измерений, которая крайне важна при глубинном сканировании объекта, по результатам которого определяется его внутренняя структура.

Эффект «прижима», в принципе, можно связывать с контактной емкостью, определяемой зазором между измерительным конденсатором и поверхностью исследуемого объекта. Контактная емкость входит в состав нагрузки на конце резонатора. При независимых измерениях и субъективном контроле «прижима» вариации силы давления датчика на объект приводят к вариации величины зазора и, как следствие, к изменению показаний диагностической системы. Однако оценки показывают, что контактный зазор и соответствующий ему емкостной импеданс при исследовании биологических тканей крайне мал и не может вызвать заметной ошибки в измерениях. Контактная емкость играет роль для твердых сред, имеющих неровную либо шероховатую поверхность, вследствие чего при измерениях возникает воздушный зазор между объектом и измерительной частью датчика. Таким образом, эффект «прижима» в случае биологических сред определяется причинами, не связанными с контактной емкостью.

Кожа человека представлена тремя слоями. Самым верхним (внешним) слоем является эпидермис, толщина которого на разных участках тела отличается. В зависимости от этого кожу классифицируют на толстую (на подошвах, ладонях) и тонкую (на остальных частях тела). Эпидермис, состоит в свою очередь еще из пяти слоев и не содержит кровеносных сосудов. Следующий слой дерма, она представлена двухслойной соединительной тканью. Самый глубокий слой - гиподерма или подкожно-жировая

клетчатка. В подлежащих коже тканях могут располагаться мышцы или кости. Мягкие и упругие ткани легко деформируются, при этом меняется их толщина, плотность и влагосодержание. В частности, если под исследуемой областью присутствует костная ткань, изменение силы «прижима» приведет к изменению расстояния до поверхности кости. Таким образом, механическое воздействие датчика на биологическую ткань вызывает изменение ее внутренней структуры.

Пути решения данной проблемы зависят от постановки конкретной задачи. В общем случае при сканировании неоднородной структуры мягких тканей системой резонансных датчиков с разными глубинами зондирования необходимо, чтобы измерительные системы имели одинаковую площадь соприкосновения с объектом и одинаковую силу «прижима» (к примеру, под собственным весом). На рис. 3.3 показана разработанная и реализованная система контроля силы прижатия датчика к биологической ткани. Для этого в резонансный аппликатор была встроена динамометрическое устройство – пружина. При определенной силе прижатия датчика к исследуемой среде замыкался контакт, и происходила запись данных с измерительной системы.

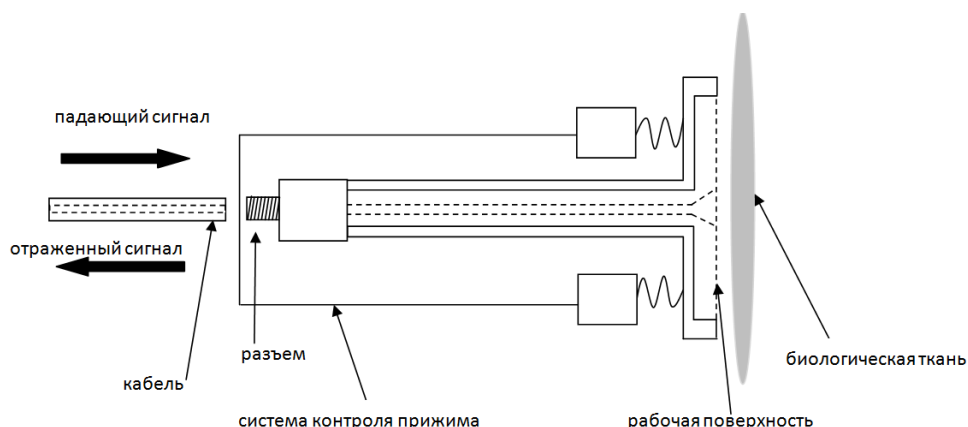


Рис. 3.3 Схема динамометрического устройства, встроенного в резонансный аппликатор, позволяющего контролировать силу прижатия датчика к биологической ткани.

При исследовании однородных биологических тканей или тонких приповерхностных слоев кожи, для которых деформация несущественна, необходимо, чтобы глубины зондирования датчиков не превышали толщину исследуемой области. В этом случае деформация нижележащих слоев не будет сказываться на результатах измерений.

С точки зрения электродинамики, емкость открытого конца коаксиального кабеля эквивалентна краевой емкости цилиндрического конденсатора при условии, что его длина существенно превосходит расстояние между обкладками. Использование такой

измерительной емкости наиболее предпочтительно для резонансной ближнеполюсной СВЧ-диагностики биологических тканей в силу простоты включения данного элемента в резонатор и возможности реализации глубин зондирования в доли миллиметра, что необходимо для диагностики кожи.

Поэтому в качестве зондирующего элемента (ближнеполюсной антенны) в разрабатываемых для диагностики тканей кожи датчиках целесообразно выбрать краевую емкость цилиндрического конденсатора, внешняя обкладка которого оканчивается металлическим фланцем. Характерный масштаб локализации его электрического поля зависит от расстояния между внешним и центральным проводниками. Применительно к ближнеполюсной томографии кожи глубины зондирования датчиков не должны превышать толщину кожного покрова, площадь торца измерительного конденсатора должна быть одинакова. Реализация данных требований позволяет практически исключить негативное влияние эффекта «прижима».

3.3 Резонансная ближнеполюсная диагностика биологических тканей

Резонансное ближнеполюсное СВЧ-зондирование представляет значительный интерес для различных медицинских приложений. Патологические процессы в организме человека, как правило, сопровождаются изменением диэлектрической проницаемости и проводимости биологических тканей. Данное обстоятельство можно использовать для неинвазивной диагностики (без проколов и разрезов) различных патологий в организме человека. Резонансная ближнеполюсная СВЧ-диагностика достаточно актуальна в дерматологии при диагностике различных форм кожных заболеваний, идентификация которых даже в клинических условиях бывает весьма затруднена. Для постановки диагноза в этих случаях используется гистоморфологический метод, который является инвазивным и относится к разряду «малых» операций. Взятие биопсии часто весьма нежелательно, например, в педиатрической практике, у пациентов с нарушением углеводного обмена, сосудистой патологией, при высыпаниях на открытых участках (лицо, шея, кисти), при подозрении на меланому кожи. Большие перспективы открываются у резонансной ближнеполюсной СВЧ-диагностики и при зондировании онкологических новообразований расположенных как на поверхности органов, так и скрытых под покровными структурами (эпителием). Особенно важной она представляется при интраоперационном определении границ патологических образований.

Основой для развития метода резонансной ближнеполюсной СВЧ-диагностики послужили исследования с помощью резонансных датчиков. Диагностической

информацией о патологических изменениях биологических тканей являлась их интегральная диэлектрическая проницаемость на глубине зондирования датчика. Была показана эффективность метода резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования для неинвазивной диагностики хронических кожных дерматозов [70-76], для экспресс-диагностики жизнеспособности трансплантатов [76-78].

В работах [76] были проведены измерения электродинамических характеристик кожи 32 больных псориазом, 10 больных атопическим дерматитом, 13 больных красным плоским лишаем (КПЛ). При этом использовался датчик с глубиной зондирования 0.2мм, который фиксировал интегральную диэлектрическую проницаемость тканей эпидермиса. Исследования проводились в условиях клиники совместно с научными сотрудниками ФГУ "Нижегородский научно-исследовательский кожно-венерологический институт".

В экспериментах локализованный очаг заболевания изучался по следующей методике. Измерительная емкость датчика прикладывалась к центральной части патологической области, к ее границе и непосредственно к здоровой коже. Исследования больных проводились до лечения, а также в процессе и по окончании терапии. Было установлено, что диэлектрическая проницаемость и проводимость кожи у дерматологических больных (псориаз, атопический дерматит, красный плоский лишай) ниже, чем у здоровой кожи. По мере выздоровления диэлектрическая проницаемость и проводимость тканей в области очагов поражений у всех трёх групп больных приближалась к показаниям здоровой кожи [76].

При обострении, различия между электродинамическими характеристиками здоровой и больной кожи были более выражены при псориазе. В стадии регресса диэлектрическая проницаемость и проводимость тканей кожи при атопическом дерматите и псориазе были идентичны. Таким образом, диагностическая значимость метода резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования в случае псориаза и атопического дерматита имеет место лишь в активной фазе.

При исследовании электродинамических характеристик кожи больных красным плоским лишаем (КПЛ) было установлено, что при совпадении диэлектрической проницаемости тканей при псориазе и КПЛ, проводимость кожи при этих заболеваниях отличаются в 2 раза. Таким образом, проводить диагностику при псориазе и КПЛ можно на любых стадиях заболевания.

Для демонстрации возможности получения изображений подповерхностной структуры неоднородных сред проводилось двумерное сканирование области, содержащей тефлоновый параллелепипед размером 8x8x10мм в однородной проводящей среде. Глубина залегания параллелепипеда составляла 0.5мм. Измерительные емкости

датчиков перемещались по границе раздела спирт-воздух. Для этого использовалась двухкоординатная система линейного перемещения, оснащенная шаговыми двигателями. Шаг по координатам составлял 0.2мм. Попадание неоднородности в область квазистатического поля измерительной емкости приводило к изменению резонансной частоты датчика и амплитуды сигнала в максимуме резонансной кривой относительно значений, соответствующих полупространству, заполненному спиртом. Очевидно, что данные изменения будут тем больше выражены, чем больше глубина зондирования измерительной системы. По результатам сканирования для каждого датчика проводился численный расчет двумерного распределения интегральной диэлектрической проницаемости с помощью развитой в работе электродинамической модели. Результаты визуализации неоднородности по двумерному распределению интегральной диэлектрической проницаемости среды представлены на рис. 3.4. Выполненные измерения показывают, что на фоне однородной среды наблюдается контрастное образование, указывающее на присутствие неоднородности. Величина контраста увеличивается с увеличением глубины зондирования датчика. Для датчиков с номером 1 и 2 контрастное образование имеет прямоугольную форму. В его центральной области диэлектрическая проницаемость постоянна, что соответствует положениям, когда измерительная емкость находится полностью над верхней гранью параллелепипеда. Качественно, размер этой области соответствует разнице между длиной (шириной) l неоднородности и диаметром $d = 2r_2$ внешнего проводника измерительной цилиндрической емкости, а размер самого контрастного образования соответствует величине $l + d$. Таким образом, имея априорную информацию, что неоднородность имеет геометрию прямоугольного параллелепипеда, можно определить ее длину и ширину. При увеличении глубины зондирования датчика происходит увеличение размеров контрастного образования и размытие границ неоднородности. Это отчетливо начинает проявляться когда $l \sim d$, что имеет место применительно к третьему датчику.

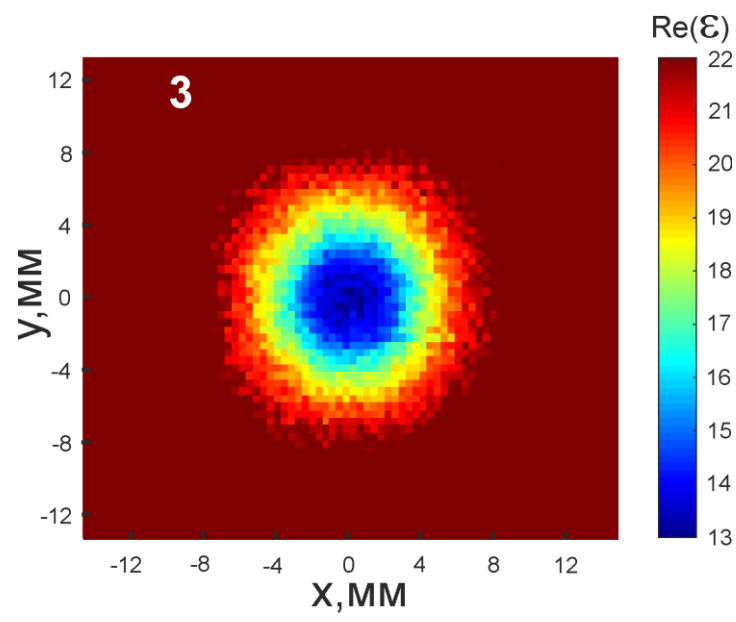
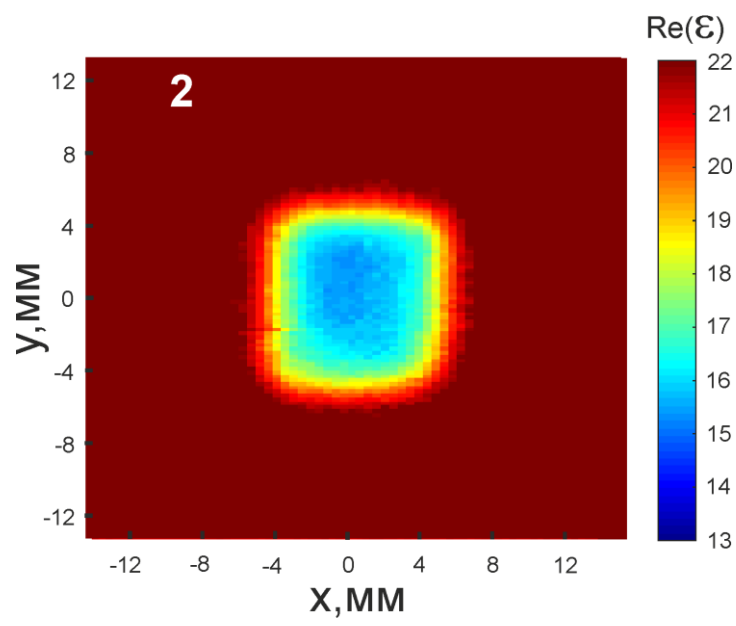
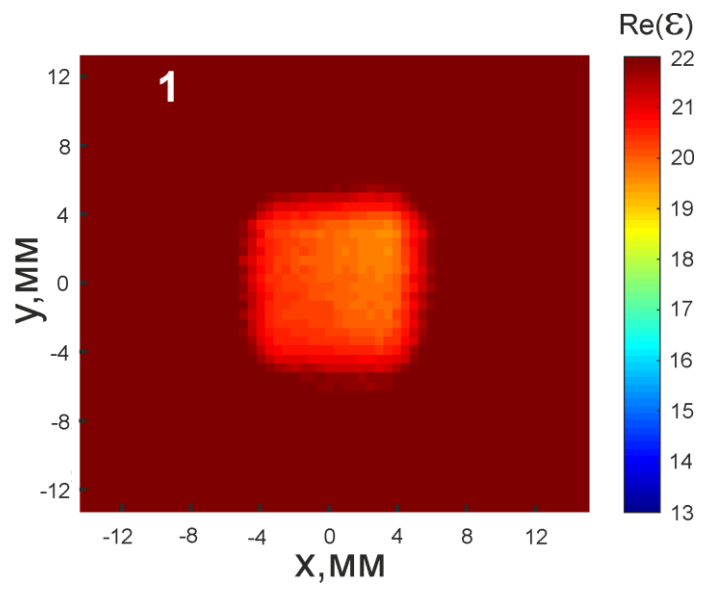


Рис. 3.4. Результаты визуализации по двумерному распределению интегральной диэлектрической проницаемости среды неоднородности в виде прямоугольного параллелепипеда из тефлона размером 8x8x10мм расположенного в спирту на глубине 0.5мм: (1) – датчик с глубиной зондирования $h_{zond} = 1.4\text{мм}$, (2) – датчик с $h_{zond} = 2.5\text{мм}$, (3) – датчик с $h_{zond} = 3.5\text{мм}$.

3.3.1 Диагностики меланомы кожи

Измерительная система для исследования меланомы кожи представляет собой СВЧ-резонатор в виде отрезка коаксиальной линии с фторопластовым заполнением, на одном конце которого расположена магнитная рамка. К противоположному концу резонатора, посредством выносного коаксиального кабеля длиной 1 м подключается аппликатор, содержащий на конце цилиндрический конденсатор длиной 1 см (рис. 3.5). Зондирование биологических тканей осуществляется краевой емкостью цилиндрического конденсатора аппликатора. Для уменьшения вносимых в резонатор потерь при контакте с поверхностью исследуемого объекта в точке подключения выносного кабеля к резонатору параллельно впаяна индуктивность порядка 5 нГн.

Торец измерительной емкости прикладывается к поверхности исследуемой среды. Наличие вещества в области краевого квазистатического поля измерительной емкости приводит к изменению резонансной частоты и добротности системы. Для глубинного зондирования тканей кожи изготовлено три аппликатора: радиус внешней обкладки цилиндрических емкостей (аппликатора) составлял 2 мм, внутренней – соответственно 1.5 мм, 0.75 мм и 0.35 мм. Собственные частоты датчиков 600-700 МГц, добротность резонансных системы ~ 150 . Датчики снабжены динамометрическим устройством, позволяющим контролировать силу прижима аппликатора на биологическую ткань.



Рис. 3.5 Внешний вид одного из датчиков для диагностики меланомы кожи

Основной характеристикой описанных выше датчиков при диагностике неоднородных по глубине сред является их максимальная глубина зондирования h_{zond} , определяемой геометрическими размерами измерительной емкости (радиусом r_1 центрального и радиусом r_2 внешнего проводника цилиндрического конденсатора), параметрами резонансной системы ближнепольного датчика и электродинамическими характеристиками тестируемой среды. Очевидно, что характерный масштаб локализации

электрического поля измерительной емкости определяется расстоянием между ее проводниками. Поэтому чем больше это расстояние, тем больше максимальная глубина зондирования датчика. Кроме того h_{zond} зависит от индуктивности Lx (рис. 3.1), подключенной параллельно выносному коаксиальному кабелю. Чем больше Lx , тем выше чувствительность резонансной системы и как следствие больше глубина зондирования. При заданной геометрии измерительной емкости и параметрах резонансной системы h_{zond} увеличивается в случае более контрастных неоднородностей изучаемого объекта.

Для оценки максимальной глубины зондирования датчиков применительно к исследованию кожного покрова оценивалось поведение резонансной кривой датчика в зависимости от расстояния h между измерительной емкостью и поверхностью жидкости, находящейся в кювете. В качестве жидкости использовался спирт, измерительная емкость располагалась в воздухе. Объем, занимаемый спиртом с комплексной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 24 - j \cdot 10$, можно было рассматривать как инородное включение, находящееся в воздушном полупространстве с $\varepsilon = 1$, а расстояние h – как глубину его залегания. Контрастность действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости была соответственно 1:24 и 1:10. В эксперименте частотный сдвиг резонансных систем был максимален при непосредственном контакте со спиртом и уменьшался при увеличении расстояния h . После некоторого h частотный сдвиг становится равным нулю, и датчик не замечает присутствие инородного объекта. Данное расстояние соответствует максимальной глубиной зондирования h_{zond} . Результаты измерений h_{zond} для используемых датчиков приведены в таблице 3.1. Поскольку поверхностные слои кожи характеризуются низким влагосодержанием (малой проводимостью) и диэлектрической проницаемостью порядка единицы, значения h_{zond} , приведенные в таблице 1, можно использовать для оценки глубины зондирования измерительных систем при исследовании кожи.

Таблица 3.1. Глубины зондирования датчиков.

Номер датчика	1	2	3
Параметры измерительной емкости	$r_1 = 1.5\text{мм}$ $r_2 = 2\text{мм}$	$r_1 = 0.75\text{мм}$ $r_2 = 2\text{мм}$	$r_1 = 0.35\text{мм}$ $r_2 = 2\text{мм}$
h_{zond} (мм)	0.2	0.8	1.1

Для демонстрации возможностей измерительных систем проведено изучение глубинной структуры здоровой кожи. Исследование осуществлялось следующим образом. Сначала измерения проводятся датчиком с наименьшей глубиной зондирования h_1 , результаты измерений отражают интегральные свойства среды ($\epsilon_{эфф1}$) в приповерхностном слое толщиной h_1 . Для датчика с глубиной зондирования $h_2 > h_1$ - интегральные свойства среды ($\epsilon_{эфф2}$) в приповерхностном слое уже большей толщиной h_2 и т.д. Зная отклики измерительных систем с разными $h_{зонд}$, можно восстановить изменение эффективной комплексной диэлектрической проницаемости среды при увеличении глубины зондирования датчиков.

На рис. 3.6 представлена $\epsilon_{эфф}$ кожи кисти и мозолистого участка ладони для трех датчиков. Из рисунков видно, что эффективная диэлектрическая проницаемость растет с увеличением глубины зондирования. Это свидетельствует об увеличении диэлектрической проницаемости тканей кожи по мере удаления от ее поверхности.

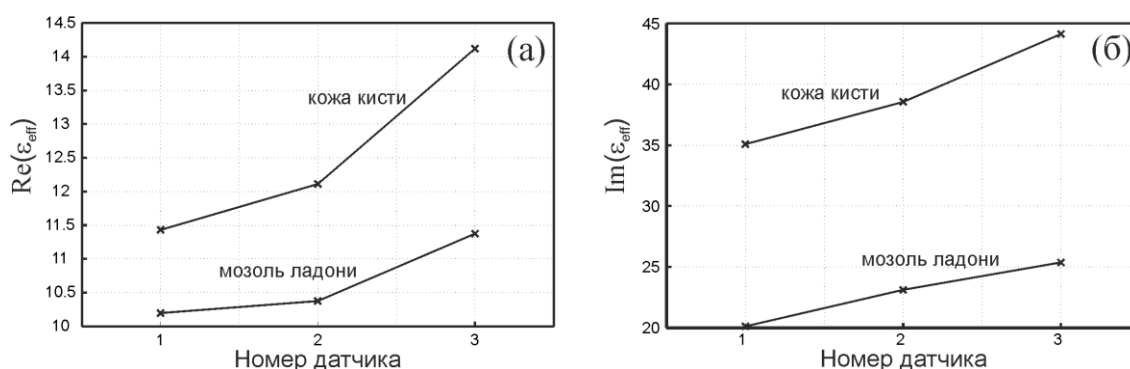


Рис. 3.6. Действительная (а) и мнимая (б) части эффективной диэлектрической проницаемости кожи кисти и мозолистого участка ладони для трех датчиков.

Представленные на рис. 3.6 значения $\epsilon_{эфф}$ для разных глубин зондирования являются данными для решения обратной задачи по восстановлению пространственного распределения комплексной диэлектрической проницаемости кожи. Применительно к диагностике меланомы кожи была проведена отработка метода резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования на группе добровольцев, имевших на поверхности кожи невус либо меланому. По клиническим показаниям новообразования были удалены и подвергнуты гистологическому исследованию, при котором диагноз был подтвержден морфологически. По данным гистологического исследования пять человек составила

группа с диагнозом: внутридермальный пигментный невус кожи, пятерым поставлен диагноз меланома кожи. На рис. 3.7 представлены результаты измерений действительной части $\varepsilon_{эфф}$ тканей кожи датчиком с глубиной зондирования 1.1 мм. Из экспериментальных данных следует, что электродинамические свойства пигментного невуса и здоровой кожи практически не отличаются. У тканей меланомы $Re(\varepsilon_{эфф})$ меньше чем у здоровой кожи примерно в 2 раза.

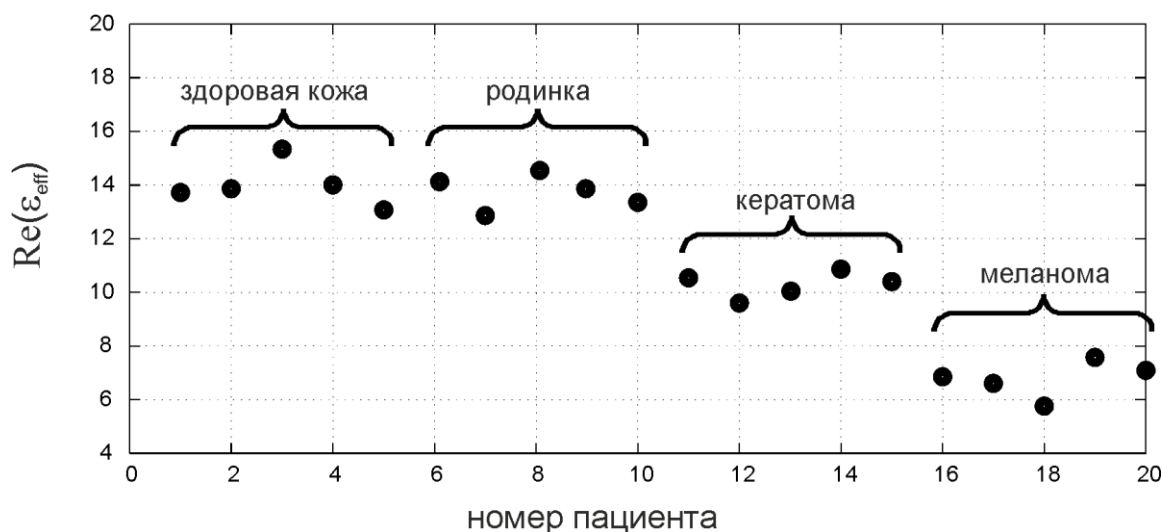


Рис. 3.7 Действительная часть эффективной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{эфф}$ кожи для датчика с глубиной зондирования 1.1мм кожи в области пигментных новообразований.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность использования резонансного ближнеполюсного СВЧ-зондирования для исследования глубинной структуры кожи. Применительно к диагностике пигментных новообразований кожи показаны различия интегральной диэлектрической проницаемости тканей кожи в области пигментного невуса и меланомы кожи.

3.3.2 Оценка состояния ожоговой раны

В настоящее время ожоги остаются одним из наиболее распространенных видов травм, не демонстрируя тенденции к снижению частоты на протяжении многих десятилетий. Среди прочих травм, термические поражения сейчас занимают третье место в Российской Федерации. Ежегодно в России регистрируется около 500 тысяч случаев ожогов, что составляет 6-8 % в общей структуре травматизма. В связи с урбанизацией,

увеличением количества производственных объектов в последние годы в различных странах мира отмечается тенденция к увеличению числа пожаров и полученных при этом ожоговых травм. Даже вне военного времени, характеризующегося высоким числом пострадавших с ожогами, частота бытового травматизма, а также периодически возникающие крупные пожары в местах массового скопления людей (торговые центры, развлекательные учреждения и др.) заставляют оптимизировать методы помощи данной категории пациентов, в том числе в условиях их массового поступления. Вопросы экспресс-оценки локального статуса ожоговой раны, непосредственно оказывающие влияние на выбор тактики ведения пациента, остаются не до конца раскрытыми.

В настоящее время диагностика ожоговой раны в большинстве случаев основывается на клинических данных и опыте врача, тогда как современные технологии визуализации (компьютерная рентгеновская и магнитно-резонансная томография, ультразвуковое исследование) для указанных задач практически не используются. Это обусловлено слабыми возможностями визуализации именно тканей кожи приведенными методами. Единственными альтернативными вариантами оценки состояния кожи в области раны и окolorаневой поверхности, а также степени приживаемости кожных ауто- и аллотрансплантатов доступными лишь в условиях высокотехнологичных клиник и центров, до настоящего времени являлись тепловизионное ИК исследование и лазерное изучение состояния микроциркуляции [50-53]. Важно отметить, что с помощью тепловидения можно зарегистрировать лишь температуру на поверхности кожи, что зачастую снижает и/или искажает интерпретацию результата исследования. Мониторинг микроциркуляции с помощью лазерной доплеровской флуометрии более информативен, так не только дает информацию об интенсивности кровотока и, следовательно, жизнеспособности участка и его регенераторном потенциале, но и позволяет уточнить соотношение регуляторных механизмов. В то же время глубина проникновения луча лазера не превышает 3 мм, что недостаточно для полноценного описания состояния раны и окружающих ее тканей. Кроме того, для проведения исследования необходим тесный контакт датчика с поверхностью раны, что затруднительно при наличии на ней временного или постоянного раневого покрытия, в особенности – содержащего биоматериал (в частности, стволовые клетки).

Исторически для выявления изменения в тканях при термическом поражении привлекательной представлялась идея использования красителей, нанесение которых на раны или введение в кровеносное русло позволило бы визуализировать нарушения в коже, вызванные ожогом [54, 55]. Нередко такие красители называли «витальными» так как они по-разному окрашивали жизнеспособные и мертвые ткани. Известны попытки введения

следующих красителей: дисульфанового синего, синего Эванса, димифена голубого, конго красного, голубого бромфенола, patentblue и другие. Известен метод, когда для определения глубины ожога на пораженную кожу наносили 0,2% кислого фуксина в полунасыщенном 1% растворе пикриновой кислоты. При этом участки ожога I и II степени прокрашивались в ярко-розовый цвет, глубокие ожоги имели ярко желтую окраску, при поражении IIIa степени имели место промежуточные варианты окраски. Внутривенно вводили также некоторые флюоресцентные красители: флюоресцеин, флюорескамин, окситетрациклин и другие. После этого кожу облучали ультрафиолетом и отмечали наличие свечения. Этот метод позволяет проводить дифференциальную диагностику глубоких и поверхностных поражений. Попытки использования этих красителей не дали ожидаемых результатов, а наличие побочных эффектов сводит на нет достигнутый положительный результат, поэтому эти методы не применяются в клинической практике. Известна методика оценки ожогового поражения по измерению проводимости тканей [54, 55], однако она до сих пор не нашла широкого применения в практике из-за присущих ей недостатков: а) большая площадь электродов (для снижения переходного сопротивления электрод-кожа), и, как следствие, низкая разрешающая способность; б) электрический ток проходит по пути наименьшего сопротивления, а не строго между электродов, отсюда невозможность оценки поражения в ограниченной области. Диагностику рубцовой ткани, как и оценку произошедших в процессе лечения изменений, также проводят, главным образом, посредством визуального и тактильного осмотра пациента врачом. Учитывается наличие субъективных ощущений больного (зуд, чувство стяжения и др.), цвет рубца, его размеры, форму и плотность [56, 57]. По этим же признакам, выраженным в качественных («присутствует» - «отсутствует») или же имеющим полуколичественный характер показателях («-», «+», «++», «+++» и т.п.), оценивают эффект от лечения. Недостатком является то, что такая оценка всегда имеет субъективный характер, зависит от опыта и квалификации. Частота рассогласования между клинической и гистологической картиной при диагностике рубцов достигает 75-80 %. Это приводит к тому, что специалисты часто не делают различий в тактике лечения рубцов разного вида [58]. В последнее время делаются попытки по разработке теоретических принципов прогнозирования гистологической структуры кожных рубцов с использованием клинических данных и определение алгоритма принятия морфологически обоснованного решения при выборе хирургической или консервативной стратегии лечения без выполнения биопсийной диагностики [59]. Однако перспектива их использования в клинической практике довольно сомнительна.

Одним из высокоинформативных методов, позволяющих получать наиболее ценную и полную диагностическую информацию о рубцовом процессе, является гистологическое изучение биоптатов рубцово-измененных тканей с применением световой микроскопии, а также гистохимических и иммуногистохимических исследований [60-62]. Однако, процедура взятия биоптата инвазивна, относится к разряду «малых» операций. Получение биоптатов рубцов до начала лечения затруднительно по этическим причинам и, кроме того, может стать причиной избыточного роста рубца, то есть еще более провоцировать развитие рубцовой ткани.

Развитие ультразвуковой техники и появление высокочастотных датчиков способствовало внедрению ультразвукового исследования в дерматологию, косметологию. В основе УЗИ диагностики лежит принцип сканирования тканей ультразвуком в режиме импульс — эхо. На сегодняшний день она применяется в диагностике диффузной и очаговой склеродермии, псориаза, опухолей кожи [63-65]. Однако попытки использования ультразвукового метода для оценки рубцовых деформаций встречаются лишь в единичных работах [66-68]. Применение УЗИ позволяет, в принципе, определить толщину, плотность и эластичность рубцовых тканей, но ожидаемых диагностических результатов в настоящее время пока не получено. В отечественной и зарубежной литературе мы не встретили описания структуры рубцов разной степени зрелости и критериев дифференциальной диагностики рубцовой ткани методом ультразвукового зондирования.

Стоит отметить, что высокочастотные системы визуализации высокого разрешения с частотами ультразвукового сканирования в диапазоне 20—100 МГц чрезвычайно дороги и недоступны для научно-исследовательских институтов и других научных организации, изучающие биофизические процессы в живых системах. Поэтому исследования по применению УЗИ для диагностики рубцовой ткани будут вестись крайне медленно.

Бурное развитие в последнее десятилетие получили методы оптического биомиджинга, таких как оптическая когерентная томография (ОКТ), оптическая диффузионная томография (ОДТ), диффузионная флуоресцентная томография (ДФТ) и многофотонная флуоресцентная микроскопия (МФМ). Данные методы визуализации обладает высокой информативностью и разрешающей способностью, что закономерно подтверждается большим числом публикаций в научной литературе. Однако малая глубина проникновения оптического излучения существенно сужает область применения оптической методики. С ее помощью в принципе можно исследовать рубцовые ткани только в тонком (порядка 0,5-1 мм) приповерхностном слое, но и подобных исследований в научной литературе мы не обнаружили.

Известные и доступные методы исследования кожи позволяют определить те или иные физико-химические параметры кожи (рН поверхности, влагосодержание, механические свойства кожи, состояние кровообращения, рельеф поверхности, электрическую проводимость и пр.) и имеют весьма ограниченные возможности по применению для диагностики [69].

Одной из наиболее значимых задач, решаемых хирургом в процессе первичного обследования пациента с ожогом, служит уточнение глубины поражения и его границ, а также состояния окolorаневой и краевой зон [79, 80]. Данная информация является залогом правильности выбора лечебной тактики и ее успешности, как и эффективности последующих реабилитационных мероприятий. В условиях острой ожоговой травмы морфологическая диагностика недопустима, поэтому необходимы альтернативные неинвазивные экспресс-методы оценки состояния раны. В последние десятилетия для решения указанной задачи активно тестируется ИК-термография [81-83], однако она, несмотря на определенную диагностическую ценность, позволяет получить информацию лишь о поверхностной температуре участка кожи. В то же время анализ глубинных температур и физико-химических параметров кожи в области раны и окolorаневой зоны остается затруднительным.

Не менее актуальной и нерешенной на сегодняшний день задачей является мониторинг состояния раны в динамике проводимого лечения у пациентов с термической травмой без снятия временных или постоянных раневых покрытий, в том числе с использованием клеточных технологий. Решение этой задачи позволит выделить объективные инструментальные критерии состояния ожоговой раны в ее толще, не прибегая к инвазивным процедурам. Также в реконструктивно-пластической хирургии востребована диагностика послеожоговых рубцов на различных стадиях их формирования, а также реконструктивно-пластическая хирургия [84].

Таким образом, имеющиеся данные свидетельствуют о целесообразности и актуальности разработки новых достоверных неинвазивных диагностических методов в комбустиологии и реконструктивно-пластической хирургии.

Резонансная ближнепольная импедансная СВЧ-диагностика способна стать единственным неинвазивным методом в оценке состояния кожи и подлежащих структур как в остром посттравматическом периоде без снятия раневой повязки, так и на этапе реабилитационного лечения (при коррекции послеожоговых контрактур и рубцов) ожоговых больных. Рассматриваемый метод может позволить прогнозировать образование патологических рубцов с учетом их гистологического типа, что, в свою

очередь, способно оптимизировать тактику лечения данного контингента пациентов и оценивать перспективы рецидивирования патологического процесса

Для демонстрации перспективности метода резонансного СВЧ-зондирования применительно к диагностике ожоговых ран была изготовлена система из пяти резонансных датчиков (с собственными частотами в диапазоне 700-800 МГц) с зондирующими элементами в виде цилиндрических конденсаторов с металлическим фланцем, у которых ближнее поле проникает на глубину порядка 1-5 мм, с радиусом внутренней обкладки конденсатора $r_1=0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3\text{ мм}$ при постоянных размерах внешней обкладки конденсатора $r_2=3.8\text{ мм}$. Выполнены исследования возмущений профилей диэлектрических параметров структуры кожи, связанные с ее трансформацией при термической травме в форме контактного термического ожога на предварительно эпилированной поверхности кожи спины, в экспериментах на шести крысах линии Вистар. На рис. 3.8 представлены результаты эксперимента по резонансной СВЧ диагностике ожогов, где приведены отклонения в ожоге измерительной емкости $\Delta \text{Im}C''$ и восстановленных профилей мнимой части диэлектрической проницаемости $\Delta \varepsilon''(z)$ от соответствующих параметров здоровой кожи. Можно видеть, что влияние ожога проявляется в уменьшении значений $\varepsilon''(z)$ в приповерхностном слое и возрастании на глубинах 2-4 мм. Учитывая, что мнимая часть диэлектрической проницаемости существенно определяется водосодержанием тканей, можно интерпретировать наблюдаемое возмущение профилей, полагая, что сухая ожоговая корочка верхнего слоя объясняет пониженные значения ε'' , а расположенный глубже влажный ожоговый пузырь – повышенные значения [9, 10].

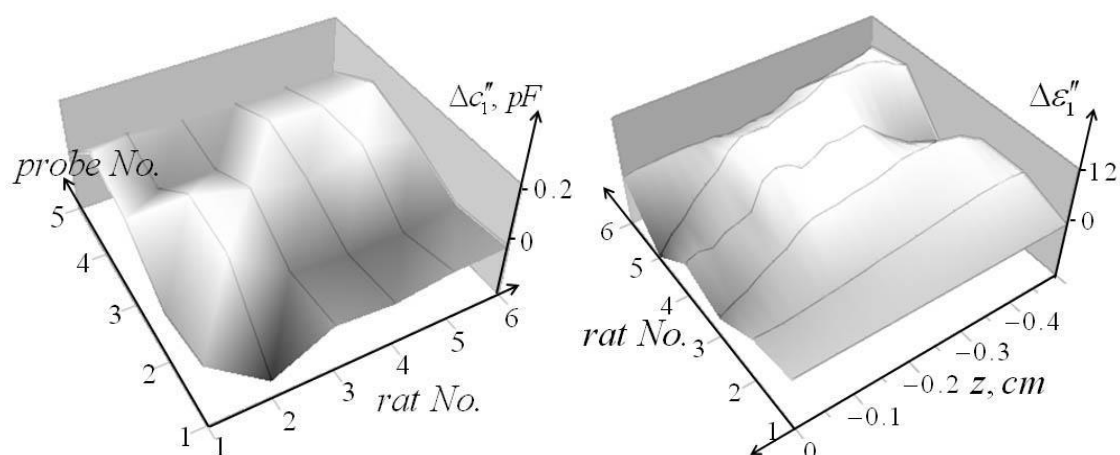


Рис. 3.8 Резонансная ближнепольная диагностика глубинной структуры кожи 6 крыс в ожоге. Слева - приращение $\Delta C''$ в области ожога; справа - соответствующее изменение

$\Delta \varepsilon''$

Также изучены особенности глубинной структуры диэлектрических свойств кожи и подкожных тканей у животных, которым предварительно была нанесена термическая травма (в форме контактного термического ожога на предварительно эпилированной поверхности кожи спины). Оценка диэлектрической проводимости подповерхностных тканей экспериментальной ожоговой раны осуществлена нами сразу после нанесения травмы и через 1 сутки после ее моделирования. Это позволило сформировать глубинные профили кожи по данному параметру в динамике эксперимента и в сравнении с интактной биотканью (рис. 3.9). Установлено, что диэлектрические свойства ожоговой раны существенно отличаются от интактной покровной ткани, причем эти сдвиги характеризуются увеличением действительной части диэлектрической проводимости среды в обеих точках наблюдения. Так, сразу после нанесения термической травмы, наибольшие изменения имеют место в ближайших подповерхностных слоях кожи (2-3 мм.), в которых рассматриваемый показатель многократно возрастает относительно интактных крыс (в 7,46 и 9,47 раза на глубинах зондирования 2 и 3 мм, составляя около 24,0 и 25,8 соответственно. Это может быть обусловлено быстрым интенсивным локальным прогревом тканей на небольшой глубине сразу после воздействия, тогда как на более глубокие слои данный эффект еще не распространился.

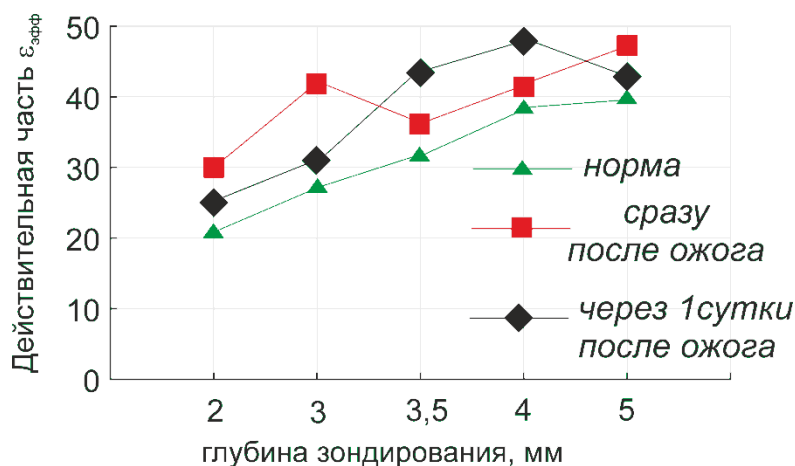


Рис. 3.9 Профиль диэлектрической проницаемости кожи и подкожных структур крыс в норме и при моделировании ожога

В дальнейшем (через 1 сутки после воспроизведения ожога) глубинный профиль диэлектрической проводимости кожи существенно трансформируется (рис. 3.9). В этот период происходит углубление поражения подповерхностных структур, что сопровождается снижением уровня изучаемого параметра на минимальных глубинах (2-3 мм) с его нарастанием относительно интактной кожи на расстоянии 3,5-5 мм под

поверхностью кожи. При этом максимум диэлектрической проводимости зафиксирован на глубине 4 мм, что в наших экспериментах соответствовало зоне наибольшего повреждения. Это свидетельствует о частичном охлаждении поверхностных слоев кожи, с одновременным перегревом более проксимально лежащих и, следовательно, смещением фокуса повреждения на более глубоко расположенные слои. Представленные данные свидетельствуют о возможности мониторинга глубины термического поражения тканей, в том числе создают экспериментальный базис для тестирования процессов углубления ожога в посттравматическом периоде

Результаты показывают перспективы применения метода в биомедицинской диагностике глубинной структуры кожи и ее нарушений, возникающих в условиях ожога. Это представляет практический интерес для нахождения глубины и объема полученной травмы, а также принципиально необходимо для выбора тактики лечения.

3.4 Выводы

В данной главе диссертации продемонстрирована эффективность метода резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования применительно к оценке структуры биологических тканей. Диагностически информативным параметром, характеризующим состояние биологической ткани, является их интегральная диэлектрическая проницаемость на глубине зондирования датчика.

Для восстановления интегральной диэлектрической проницаемости разработаны и изготовлены ближнепольные датчики в виде высокочастотного резонатора с собственными частотами порядка 700-800 МГц, нагруженного на зондирующую электрически малую антенну. Сканирование биологических тканей осуществляется путем использования системы резонансных датчиков (глубина зондирования - от 1 до 5 мм), ближнепольные антенны которых имеют разный масштаб локализации зондирующего квазистатического электрического поля. Изучен эффект «прижима», характеризующийся зависимостью показаний ближнепольного измерительного датчика от силы его давления на поверхность биообъекта. Найдены конструктивные решения, позволяющие свести к минимуму негативное влияние «прижима» путем использования динамометрического устройства в составе датчика для контроля силы прижатия аппликатора на биологическую ткань.

Экспериментальная апробация резонансной ближнепольной диагностики 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 измерительной системы.

Была показана эффективность метода резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования для неинвазивной диагностики меланомы кожи, диагностики тканей при термическом поражении. Применительно к диагностике меланомы кожи проводилась отработка метода резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования на удаленных в ходе оперативного вмешательства тканях кожи, содержащих доброкачественные и злокачественные новообразования (родинка – пигментный невус, кератома, меланома). Интегральная диэлектрическая проницаемость тканей невуса и здоровой кожи практически не имеют отличий на изучаемых глубинах (до 3 мм.). Напротив, диэлектрическая проницаемость тканей меланомы примерно в 2 раза меньше, чем у здоровой кожи ($p < 0,05$), а в случае кератомы – примерно в 1,3 раза ($p < 0,05$). Это свидетельствует о дифференциально-диагностической ценности метода при данных состояниях.

Показана информативность проведения резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования тканей в неинвазивном мониторинге их структуры, в том числе при термической травме. Продемонстрировано, что влияние ожога проявляется в уменьшении значений мнимой части эффективной диэлектрической проницаемости в приповерхностном слое и возрастании - на глубинах 2-4 мм. Выполненные исследования позволили заключить, что проведение ближнепольного СВЧ-зондирования кожи с определением интегральной комплексной диэлектрической проводимости среды на разных глубинах (до 5 мм) информативно для оценки глубины и степени поражения тканей. Также в эксперименте на крысах линии Вистар показано, что в динамике развития ожога изменяется профиль подповерхностного распределения диэлектрических свойств кожи и подлежащих тканей, причем в первые часы после получения ожога наиболее значимые изменения параметра зафиксированы в близких к поверхности слоях. По мере углубления термического поражения через 24ч наблюдалось постепенное охлаждение поверхностных слоев с частичным восстановлением их диэлектрических свойств и более

существенный сдвиг – в области более глубоких структур (базальный слой эпидермиса, ростковый слой, дерма).

Накопленный опыт изучения диэлектрических свойств кожи способен выступать в качестве базиса для развития метода резонансной СВЧ-томографии, ориентированного на восстановление глубинного профиля электродинамических параметров и создания автоматизированного ближнепольного комплекса. Это позволит оценивать морфоструктуру различных типов тканей, что может рассматриваться как основа для создания инновационной (универсальной) диагностической технологии в биомедицине.

Глава 4 РАЗВИТИЕ МЕТОДА РЕЗОНАНСНОЙ БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ СВЧ-ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

Задачи подповерхностного зондирования неоднородных сред актуальны во многих областях науки и техники. Среди наиболее востребованных из них в геологоразведке следует выделить контроль качества покрытия аэродромов и автомобильных дорог, обнаружения промоин, определения глубины промерзания грунта, толщины ледового покрытия водоемов, уровня грунтовых вод, обнаружения пластиковых мин, изучение археологических слоев Земли, поиска различного рода захоронений и т.д. Их решение необходимо строить на бесконтактном неразрушающем дистанционном методе исследования, формирующим легко и однозначно интерпретируемые пользователем изображения подземных объектов. Недостаточная обеспеченность аппаратными, программными и методическими средствами ограничивает применение существующих методов в малоглубинных изысканиях.

Применяющиеся в настоящее время подходы к изучению структуры среды и объектов, залегающих в приповерхностном слое земли, включают ограниченное число методик, основанных на нескольких геофизических методах: радиолокационных, магнитных, акустических.

Подповерхностная радиолокация является, по-видимому, самым производительным и технологичным методом [85-95]. Работа радиолокационного прибора подповерхностного зондирования, в общепринятой терминологии – георадара, основана на использовании классических принципов радиолокации. Передающей антенной прибора излучаются сверхкороткие электромагнитные видео импульсы (единицы и доли наносекунды), имеющие 1.0-1.5 периода квазигармонического сигнала и достаточно широкий спектр излучения. Центральная частота сигнала определяется типом антенны. Выбор длительности импульса определяется необходимой глубиной зондирования и разрешающей способностью прибора. Для формирования зондирующих импульсов используется возбуждение широкополосной передающей антенны перепадом напряжения (ударный метод возбуждения). Излучаемый в исследуемую среду импульс отражается от находящихся в ней предметов или неоднородностей среды, имеющих отличную от среды диэлектрическую проницаемость или проводимость, принимается приемной антенной, усиливается в широкополосном усилителе, преобразуется в цифровой вид при помощи аналого-цифрового преобразователя и запоминается для последующей обработки.

В георадарах обычно в качестве антенн используются резистивно-нагруженные дипольные вибраторы [91]. Одним из главных недостатков, особенно при работе вблизи источников техногенных помех, является их слабая помехозащищенность. Поэтому их чаще всего помещают в экранирующий кожух, однако, вследствие его больших размеров, эксплуатация таких систем еще более неудобна. Уменьшение размеров ведет к снижению эффективности геосканирования [92].

Существующие конструкции, обеспечивающие высокую проникающую способность, выполняются неэкранированными антеннами, что увеличивает мощность сигнала. Однако в этом случае электромагнитные импульсы распространяются не только в сторону исследуемой среды, но и в других направлениях. В результате прибор будет фиксировать не только сигналы, отраженные от объектов, находящихся в земле, но и сигналы, отраженные от различных наземных объектов: стен зданий, столбов, деревьев, проезжающих автомашин и т.д. Поэтому приборы с такими антеннами рекомендуется использовать только на открытой местности. В противном случае радиограмма будет сильно засорена отражениями от наземных объектов. С помощью специальной программы их можно идентифицировать, однако это сильно затрудняет обработку данных.

Известны попытки усовершенствования конструкции антенных блоков. Так, автор в [9] предлагает систему в виде параболоида из проводящего материала, в фокусе которого помещен излучатель (резистивно-нагруженный дипольный вибратор), а внутренняя полость параболоида заполнена материалом с диэлектрической проницаемостью от 16 до 80, близкой к проницаемости зондируемой поверхности. Антенна обладает относительно хорошей помехозащищенностью, узкой диаграммой направленности и высокой избирательностью к поляризации излучения. Несмотря на улучшение конструкции антенного блока (диэлектрическое экранирование), не устранены недостатки самих антенн. Так, большинство современных антенн для геосканирования выполнены в виде соединенных через резисторы пластин из фольгированного текстолита. Резисторы подбираются с таким расчетом, чтобы была экспоненциальная зависимость омического сопротивления и полное гашение волны, отраженной от торцов антенны. Такая конструкция имеет ряд недостатков из-за разрывов проводника в местах расположения резисторов. Это приводит к повышенному уровню помех (так называемому «звону» антенн) и затрудняет распознавание геограмм.

В настоящее время отечественными и зарубежными фирмами проводятся исследования по усовершенствованию алгоритмов обработки и отображения получаемых радиолокационных данных и разработки методик проведения исследований с целью увеличения практической отдачи метода, однако проблемы георадаров далеки от

завершения [10]. В частности, не удастся обнаруживать и идентифицировать пластиковые противопехотные и противотанковые мины с вероятностью 99,6% и малой вероятностью ложных тревог, затруднено выполнение требования к 3-5% (от глубины зондирования) погрешности определения толщины (тем более электрофизических параметров) слоев дорожных покрытий, при обнаружении малоразмерных объектов и т. п. [94]

Акустические методы для зондирования приповерхностного слоя почвы не получили не получили большего распространения. Их использование затруднено в силу того, что акустический контакт аппаратуры с грунтом очень ненадежный и нестабильный. Проведение контроля при этом сопровождается значительными непроизводительными потерями времени на создание и поддержание акустического контакта. Среди положительных сторон акустических методов отметим возможность представления результатов контроля в виде двумерного изображения сечения произвольной ориентации внутренней структуры исследуемых объектов (томограмм), а также синтезирование трехмерного изображения обеспечивают ему ряд преимуществ и делают привлекательным для реализации в поисковой аппаратуре.

В настоящее время известна установка ультразвукового комплекса "Сирена", позволяющая определять пустоты, заполненные газом (сильно контрастные объекты) при проходке горных выработок, тоннелей и коллекторов [85-96]. При проведении ультразвукового сканирования комплексом "Сирена", из-за неплотно прижатой антенны точность обнаружения камеры с газом в почве снижается на 30-32%.

Магнитные методы обнаружения скрытых объектов в настоящее время получили широкое распространение в различных областях человеческой деятельности для обнаружения проводящих объектов в непроводящей или слабопроводящей среде. Классический металлоискатель представляет собой электронный прибор, служащий для обнаружения только металлических предметов, с их помощью не удастся детектировать диэлектрические неоднородности. Физический принцип работы некоторых простейших бытовых металлоискателей основан на системе индукционного баланса. Электронный прибор с выносной катушкой металлоискателя образуют генератор низких частот. При поднесении выносной индукционной катушки к металлу изменяется её индуктивность и, соответственно, частота генератора, что фиксируется электронным устройством металлоискателя. У импульсных металлоискателей принцип работы заложен в их названии, катушка металлоискателя излучает электрические импульсы, они возбуждают вихревые токи в проводящих предметах, создающие вторичные электромагнитные поля, которые воспринимаются индукционной катушкой в перерывах между излучениями и обрабатываются электронным устройством. Форма и длительность принимаемых сигналов

зависит от электрических свойств предмета обнаружения и глубины залегания. Данные металлоискатели не чувствительны к составу грунта, его минерализации и имеют простую конструкцию датчика. К недостатком относится большое энергопотребление, большая цена и слабая дискриминация.

Электроразведочные методы применяются в основном для рудной разведки, экологических и инженерно-геологических задач [97-101]. Наиболее благоприятны для применения метода геоэлектрические разрезы, имеющие в основании горизонт высокого сопротивления, что не всегда реализуется на практике. Недостатки этих методов связаны с повышенной чувствительностью по отношению к нарушениям горизонтальной неоднородности среды, большими временными затратами на проведение исследований, необходимость заземления электродов, недостаточная информативность данных, низкая помехоустойчивость. Основной недостаток электроразведки связан с требованием высокой квалификации при обработке данных и умением отбраковывать «негеологичные» результаты.

Задача подповерхностного зондирования земли может быть решена с помощью резонансной ближнепольной СВЧ-томографии применительно к обнаружению, определению местоположения и классификации объектов и структур искусственного и естественного происхождения, находящихся под слоем почвы, скальных пород, пресноводным или морским льдом и т.д. Разрабатываемая методика является информативным и экономически обоснованным инструментом. Важной особенностью методики является возможность ее быстрой адаптации к решению различных геофизических задач. Она превосходит существующие методы в малоглубинных изысканиях. При качественной интерпретации методика позволяет определить пространственную структуру подповерхностных объектов в режиме реального времени. В отличие от георадара она является информативной даже в городских и промышленных условиях, при чрезвычайно высоком уровне электромагнитных помех, в условиях городской застройки. Обеспечивает экономически выгодное и быстрое получение достоверных данных о подповерхностных неоднородностях комплексной диэлектрической проницаемости в грунте.

В данной главе диссертации продемонстрировано развитие метода резонансной ближнепольной СВЧ-томографии применительно к подповерхностной диагностике плоскостристых сред с проводимостью. В **разделе 4.1** раскрывается суть метода ближнепольной СВЧ-томографии, основанной на зондировании среды системой датчиков с разной глубиной зондирования, определяемой размером апертуры ближнепольной

антенны. Описание конструкции измерительной системы резонансных датчиков, измерительная часть которых изготовлена из отрезков двухпроводной линии, приведено в **разделе 4.2**. Глубина зондирования каждого датчика определялась расстоянием между измерительными проводами. Для аналитической связи диэлектрической проницаемости и проводимости среды с импедансом зондирующей антенны в **разделе 4.3** развита модель плоскостройной среды. Для такой модели удалось разработать алгоритм решения обратной задачи по восстановлению внутренней структуры зондируемой среды. В **разделе 4.4** приведено описание эксперимента и обоснование выбранной конструкции датчиков для подповерхностной диагностики водоносных слоев в грунте. Упрощенная модель водоносного слоя представлялась в виде пространства, наполненного подземной водой, расположенного в однородном по составу песке различной влажности. Апробация методики поиска водоносного слоя проводилась на локализованных проводящих неоднородностях с резкими границами в форме прямоугольных параллелепипедов (кюветы с жидкостью), расположенных в кварцевом песке различной влажности. **Раздел 4.5** посвящен экспериментальным результатам. Здесь введено понятие глубины зондирования датчика и проведено экспериментальное измерение этого параметра в зависимости от размеров датчика и влажности песка (**раздел 4.5.1**). Результаты измерений сопоставлены с численным расчетом на основе развитой модели. В **разделе 4.5.2** экспериментально продемонстрирован способ определения поперечных границ неоднородности в песке. В **разделе 4.5.3** экспериментально реализован алгоритм нахождения глубины залегания водного объема h в песке различной влажности. В **разделе 4.5.4** реализуется алгоритм восстановления геометрических и диэлектрических свойств неоднородной среды в виде песчано-водной смеси в форме прямоугольного параллелепипеда во влажном песке. Результаты эксперимента сопоставляются с истинными значениями геометрических размеров неоднородности. В **разделе 4.6** подведен итог проделанной работы и намечены перспективы развития метода резонансной ближнепольной томографии.

4.1 Суть метода резонансной ближнеполевой СВЧ-томографии

Данный метод позволяет получать информацию об электродинамических свойствах изучаемого объекта без разрушающего его непосредственного физического воздействия.

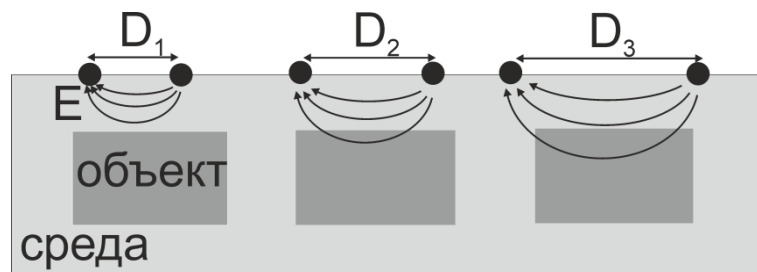


Рис. 4.1 Иллюстрация глубинного зондирования объекта электрическим полем E , область локализации которого определяется размером антенны D ($D_1 < D_2 < D_3$).

Поясним основные принципы, на которых базируется резонансная ближнеполевая томография. Область среды, находящаяся в ближнем поле зондирующей электрически малой антенны, оказывает влияние на ее импеданс. Если антенна включена в качестве нагрузки в резонатор, то по смещению и уширению резонансной кривой можно судить об электродинамических характеристиках среды (ее диэлектрической проницаемости и проводимости) вблизи антенного устройства.

Исходными данными для решения обратной задачи резонансной ближнеполевой томографии являются результаты измерения резонансных характеристик измерительной системы при сканировании над поверхностью среды системой электрически малых антенн. Глубина зондирования датчика определяется размерами антенны. Увеличение апертуры антенны влечет увеличение области локализации ближнего поля в среде и является зондирующим фактором для резонансной ближнеполевой СВЧ-томографии (рис. 4.1). 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. Применительно к глубинному сканированию поверхностных слоев грунта эту задачу можно существенно упростить, описывая проникающие в почву электромагнитные поля в рамках приближения квазистатики. К одной из важных задач требующих первоочередного решения относится задача рассмотрения распределения квазистатического электромагнитного поля в неоднородном полупространстве.

4.2 Конструкция датчика для подповерхностного зондирования грунта

СВЧ-зонд для подповерхностной диагностики водоносных горизонтов представляет собой резонансный колебательный контур с распределенными параметрами на отрезке двухпроводной линии, закороченной на одном конце и разомкнутый на другом (рис. 4.2).

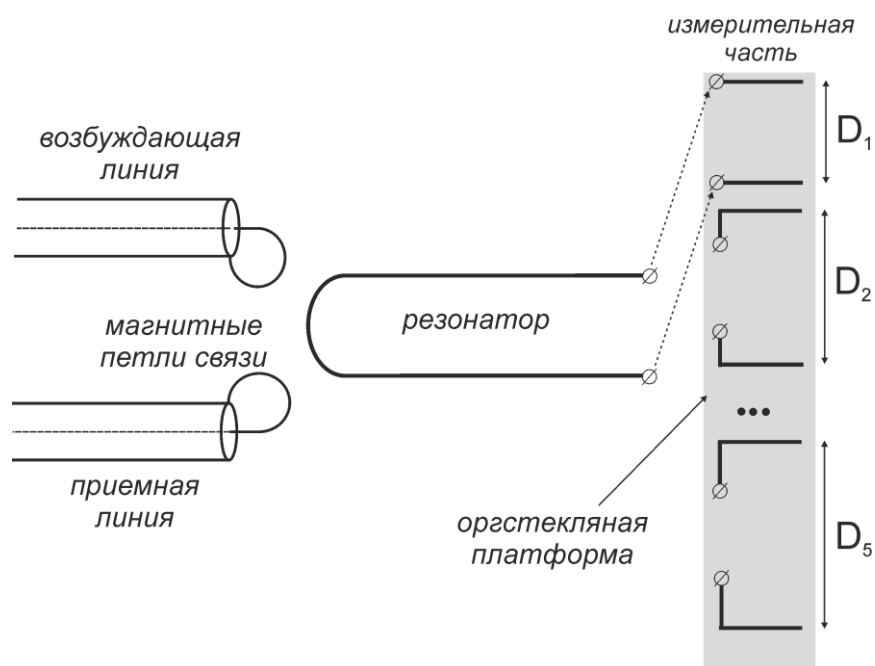


Рис. 4.2. Система резонансных ближнепольных датчиков с переменной «базой» D для подповерхностного зондирования. Пунктирными стрелками показаны места поочередного подключения резонатора к измерительной части для реализации метода резонансной ближнепольной СВЧ-томографии.

Длина резонатора 6,5 см соответствовала четверти длины волны в вакууме. Собственная частота ненагруженного резонатора 500 МГц, добротность порядка 250. Расстояние между проводами 3 мм, диаметр провода 0,75 мм. Возбуждение резонатора и прием его отклика осуществлялся коаксиальными линиями с помощью магнитных петель связи диаметром 7 мм, расположенных у закороченного конца резонатора. В качестве источника высокочастотных колебаний использовался высокостабильный маломощный СВЧ генератор SMB100A фирмы Rohde & Schwarz с погрешностью установки частоты 10^{-8} и возможностью свипирования по частоте. Сигнал с приемной петли связи детектировался, оцифровался и поступал на вход ПК для дальнейшей обработки. За один период качения частоты воспроизводилась резонансная характеристика датчика.

К открытому концу резонатора подключалась измерительная часть в виде двух параллельных проводов диаметром 0,75мм на расстоянии D и длиной 40мм. Измерительные провода были вмонтированы в диэлектрическую платформу из оргстекла размером 50*5*2см. Глубина зондирования датчика, определяемая областью локализации электрического поля в среде, по порядку величины совпадала с расстоянием между проводами. Система датчиков с разными глубинами зондирования была реализована путем поочередного подключения резонатора к соответствующей паре измерительных проводов. Для подповерхностной томографии неоднородных сред было изготовлено 5 пар отрезков измерительных проводов с расстояниями между проводами $D = 5, 9, 10.5, 12.5, 16, 20$ мм.

При приближении датчика к поверхности исследуемой среды резонансная частота и добротность датчика уменьшались. По изменениям этих параметров можно восстановить свойства исследуемого объекта.

4.3 Модель двухслойной среды

Первоочередной задачей по восстановлению диэлектрической проницаемости и проводимости исследуемой среды с помощью системы ближнепольных датчиков является нахождение связи между импедансом зондирующих антенн и комплексной диэлектрической проницаемостью. К настоящему времени имеются разнообразные методы расчета электродинамических систем. Наиболее распространенными подходами является численный расчет структуры электромагнитных полей с помощью прямого решения уравнений Максвелла – метод конечно-разностного моделирования (КРВО, англ. FDTD), и МКЭ - сеточный метод конечных элементов, предназначенный для решения систем дифференциальных уравнений с частными производными с заданными граничными условиями. Метод МКЭ используют для моделирования систем в условиях квазистатического приближения, когда не учитываются волновая составляющая зондирующего поля. Методом КРВО проводится расчет систем с учетом волнового характера поля. Универсальность данных подходов при наличии современных вычислительных ресурсов ЭВМ позволяет моделировать структуры практически любой сложности. Их существенный недостаток заключается в отсутствии аналитических выражений, описывающих рассматриваемую структуру.

В условиях эксперимента провода измерительной емкости были окружены средой со сложной пространственной структурой. С одной стороны они были закреплены на

подложке из оргстекла с известной диэлектрической проницаемостью ϵ_3 , а с другой стороны вблизи от них был расположен исследуемый объект, внутри которого распределение диэлектрической проницаемости было, вообще говоря, заранее неизвестно.

Рассмотрим плоскостойкую среду, состоящую из слоя 1 толщиной h с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 и граничащие с ней две безграничные среды 2 и 3 с диэлектрическими проницаемостями ϵ_2 и ϵ_3 , соответственно (рис. 4.3). Введем систему координат: ось x направлена вдоль плоскости раздела сред, ось y перпендикулярна границе раздела, от оси z зависимость отсутствует.

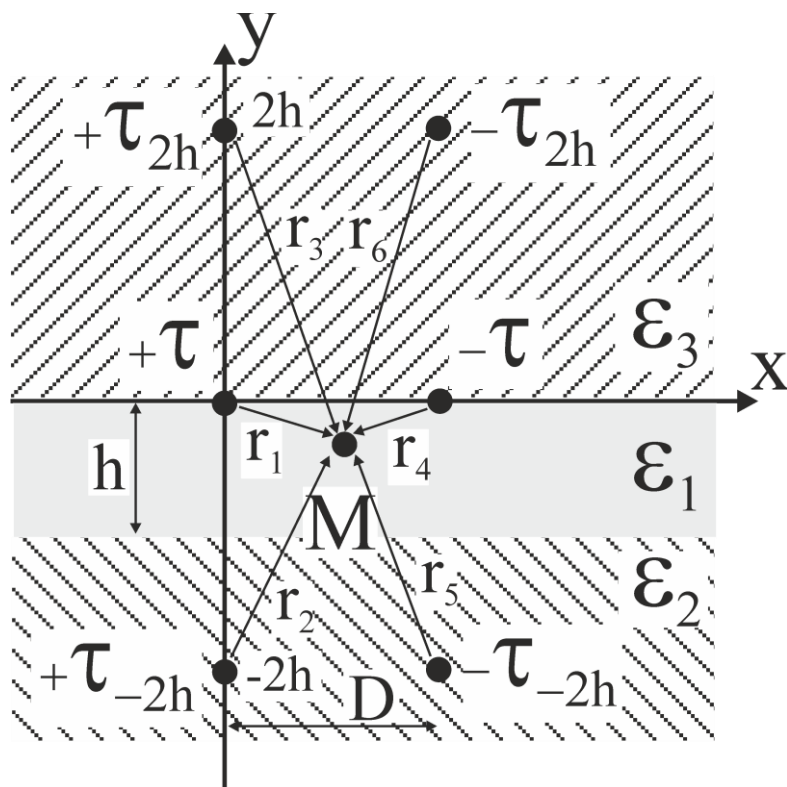


Рис. 4.3 Модель двухслойной среды

Измерительные провода резонатора расположены на границе раздела сред 1 и 3 (плоскость $y = 0$). Эффективная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{эфф}$ определяется отношением емкости двухпроводной линии измерительной части датчика в среде C к емкости в вакууме:

$$\epsilon_{эфф} = \frac{C}{C_0}, \tag{4.1}$$

где $C_0 = \frac{\pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{D}{a}}$ - погонная емкость двухпроводной линии в вакууме.

Пусть τ и $-\tau$ - линейные плотности проводов резонатора. Для нахождения электрического поля \vec{E} в среде 1 в квазистатическом приближении воспользуемся методом изображений [14], суть которого заключается в следующем. Поле \vec{E} складывается из суммы полей, создаваемых бесконечным числом нитей, получаемых последовательным отображением исходных нитей относительно плоскости $y=0$ и $y=-h$. В первом приближении можно оставить две нити изображения с линейными плотностями τ_{-2h} и τ_{+2h} , расположенные в плоскостях $y=-2h$ и $y=+2h$, т.к. с ростом номера нити n ее плотность падает, а расстояние до нее увеличивается. Плотности нитей отображения соответственно равны:

$$\begin{aligned}\tau_{-2h} &= \frac{2 \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot \tau}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)} \\ \tau_{+2h} &= \frac{2 \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \cdot \tau}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)^2}\end{aligned}\quad (4.2)$$

Напряженность суммарного электрического поля от каждой нити в точке М слоя 1 запишется в виде:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \left(\frac{2\tau \cdot \vec{r}_1}{\vec{r}_1^2} \cdot \frac{2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3} + \frac{2\tau_{-2h} \cdot \vec{r}_2}{\vec{r}_2^2} + \frac{2\tau_{+2h} \cdot \vec{r}_3}{\vec{r}_3^2} - \frac{2\tau \cdot \vec{r}_4}{\vec{r}_4^2} \cdot \frac{2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3} - \frac{2\tau_{-2h} \cdot \vec{r}_5}{\vec{r}_5^2} - \frac{2\tau_{+2h} \cdot \vec{r}_6}{\vec{r}_6^2} \right), \quad (4.3)$$

где $\vec{r}_{1,2,\dots,6}$ - радиус-векторы, проведенные в рассматриваемую точку пространства от проводов и от нитей изображений с линейными плотностями $\tau, \tau_{-2h}, \tau_{+2h}, -\tau, -\tau_{-2h}, -\tau_{+2h}$, соответственно. Разность потенциалов между проводами выражается через интеграл от проекции поля \vec{E} на ось x по отрезку, соединяющему провода резонатора:

$$U = \int_a^d E_x(x, y=0) dx \quad (4.4)$$

Интегрируя (4.3), получим:

$$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \left[2 \cdot \frac{4 \cdot \tau}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3} \cdot \ln \frac{D}{a} + 2 \cdot \frac{4 \cdot \tau \cdot \varepsilon_1 \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)^2} \cdot \ln \frac{D^2 + (2h)^2}{a^2 + (2h)^2} \right] \quad (4.5)$$

Подставляя U в емкость двухпроводной линии $C = \frac{\tau}{U}$ из (4.1) с учетом вакуумного значения разности потенциалов между проводами двухпроводной линии, получим выражение эффективной диэлектрической проницаемости среды:

$$\varepsilon_{эфф} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2 + 2 \cdot \frac{\varepsilon_1 \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)} \cdot \ln \frac{D^2 + (2h)^2}{a^2 + (2h)^2} \cdot \left(\ln \frac{D}{a} \right)^{-1}} \quad (4.6)$$

Из (4.6) видно, что $\varepsilon_{эфф}$ зависит как от параметров среды $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, h$, так и от параметров резонатора D и a . Стоит отметить, что при бесконечном удалении от датчика среды 2, т.е. при $h \rightarrow \infty$, равно как и при $\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_2$, значение $\varepsilon_{эфф}$ стремится к $(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) / 2$.

4.4 Описание эксперимента

К основным задачам ближнеполюсного подповерхностного зондирования почвы с целью поиска подземных вод относятся: определение глубины залегания ближайшего водоносного горизонта, его поперечных размеров, определение свойств грунта между поверхностью земли и водой. Водоносный горизонт – это подземная природная область, способная накапливать воду в порах пород, из которых он состоит. Подземные грунты чередуются пластами, в которых могут попадаться песок, глина, известняк, ракушняк, сланец, галька, гранит и остальные породы.

На глубине до 100м выделяют три основных типа водонесущих слоев: подпочвенный слой с глубиной залегания 2-5м, грунтовые воды, расположенные на глубине до 10м, и межпластовые воды с уровнем залегания до 100м. Последние могут быть наполнены водоносными песками или гравийно-каменными отложениями. Типичное строение водоносных горизонтов в Нижегородской области приведено на рис. 4.4.

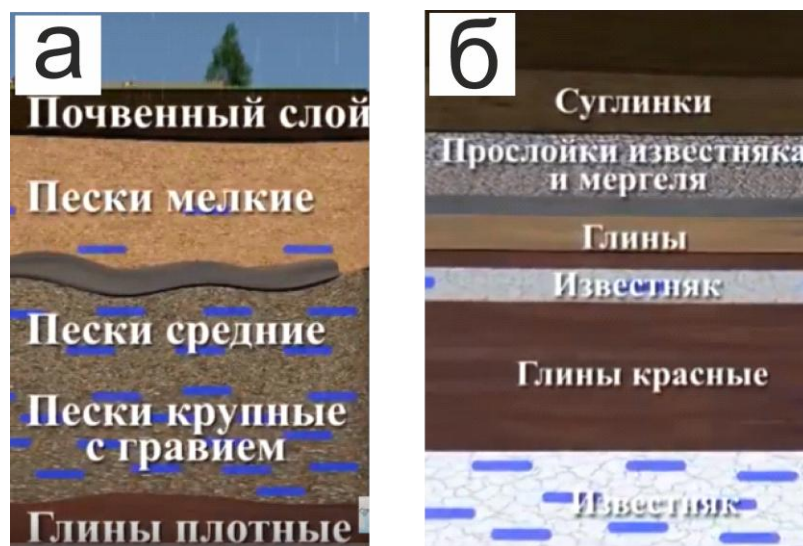


Рис. 4.4. Типичное строение водоносных горизонтов в Нижегородской области:

а) песчаный водоносный горизонт; б) водоносный горизонт, расположенный в мергелях и известняках

При радиоволновом исследовании таких сред необходимо, чтобы толщина скин-слоя электромагнитного поля превосходила глубину залегания зондируемых объектов. Оценки

показывают, что при использовании ближнепольной СВЧ-диагностики для реализации глубин зондирования влажных почвогрунтов до 100м, рабочая частота лежит в пределах до 100МГц а размеры апертуры антенны сопоставимы с глубиной зондирования. Для проведения эксперимента в масштабе 1:1 в полевых условиях пришлось бы изготовить датчики с размером более 10м, что крайне неудобно. Поэтому, для экспериментальной отработки развитой методики использовались малогабаритные высокочастотные датчики с расстоянием между проводами до 20мм и частотой порядка 370 МГц. Упрощенная модель водоносного слоя представлялась в виде полости, наполненной подземной водой, расположенной в однородном по составу песке различной влажности (рис. 4.5а). Апробация методики поиска водоносного слоя проводилась на локализованных проводящих неоднородностях с резкими границами в форме прямоугольных параллелепипедов, расположенных в кварцевом песке различной влажности на глубине h от 1 до 20 мм (рис. 4.5б). Для моделирования грунтовых вод использовалась тонкостенная пластмассовая кювета с размерами 45*50*150мм, заполненная водой, толщина стенки 0,01мм.

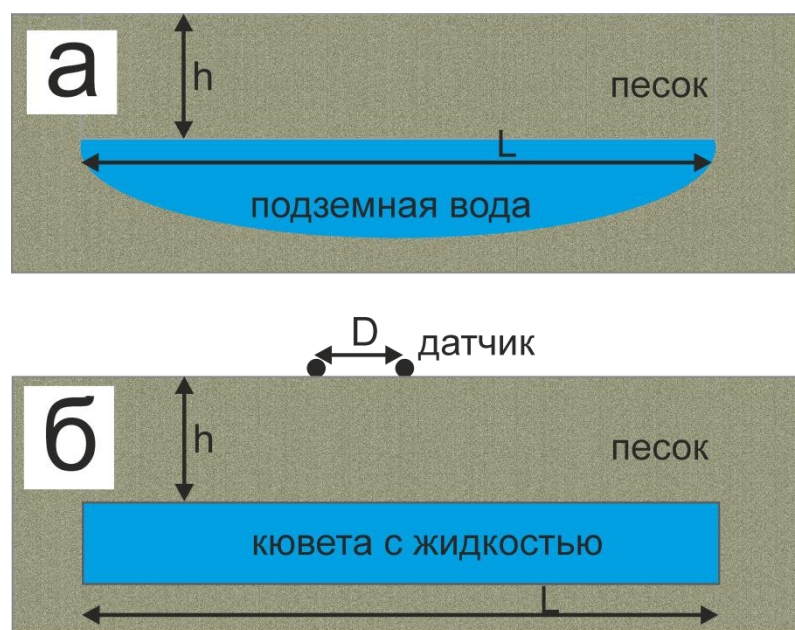


Рис. 4.5 Схема эксперимента: а) упрощенная модель водоносного слоя в виде полости, наполненной подземной водой, расположенной в однородном по составу песке; б) схема эксперимента по нахождению h - глубины залегания неоднородности и ее поперечных размеров L с помощью подповерхностного зондирования системой ближнепольных датчиков

Обратная задача по восстановлению подповерхностной структуры довольно сложна и в общем случае некорректна. Для ее решения необходима априорная

информация о свойствах исследуемой среды. Так, например, знание о резких границах неоднородности позволяет восстановить ее поперечные размеры, а наличие информации о диэлектрической проницаемости объекта (воды) дает возможность точнее определить глубину залегания.

Методика подповерхностного зондирования состояла из следующих этапов: 1) обнаружение наличия неоднородности и определение ее горизонтальных размеров L (рис.10, б); 2) определение глубины залегания неоднородности h . Водоносный слой не всегда состоит из воды как в случае с межпластовыми водами. Для моделирования поиска пескосодержащих водоносных слоев экспериментально определены геометрические и электродинамические параметры водно-песчаной смеси. Предварительно проводился расчет максимальной глубины зондирования используемых датчиков.

4.5 Экспериментальные результаты

4.5.1 Глубина зондирования

Основной характеристикой датчика является максимальная глубина зондирования h_{zond} , определяемая областью локализации электрического поля около измерительных проводов. Если расстояние до предмета h превышает h_{zond} , то датчик не чувствует объекта. Поэтому для определения границы водоносного слоя $h_{вод}$, нужна система датчиков с глубинами зондирования как меньших $h_{вод}$, так и больших $h_{вод}$. Глубина зондирования h_{zond} систем, применительно к проводящим средам, определялась на следующем модельном эксперименте. Кювета с жидкостью располагалась в песке и удалялась от измерительной поверхности (рис. 4.6).

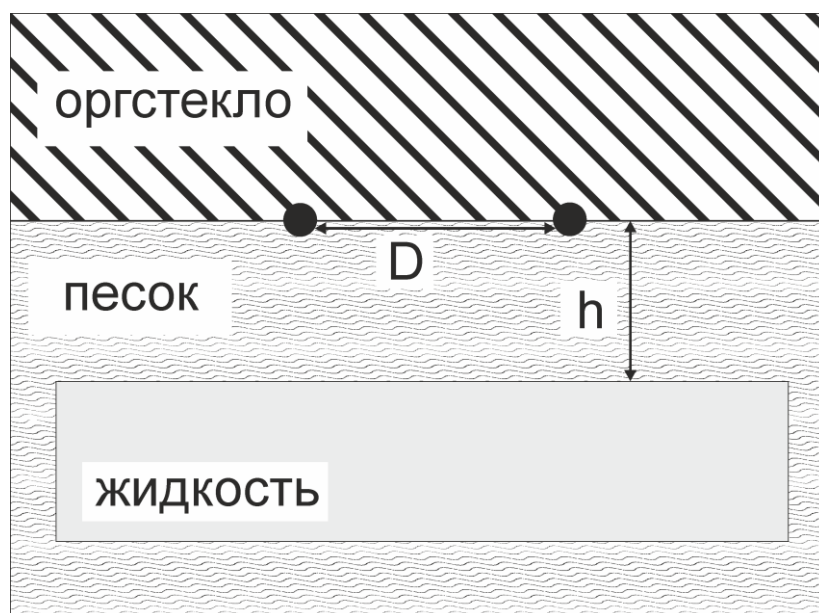


Рис. 4.6. Схема эксперимента по определению глубины зондирования датчика. h – глубина залегания неоднородности (кюветы с жидкостью), расположенной в песке, D – размер датчика.

При этом фиксировался сдвиг резонансной частоты Δf в зависимости от расстояния датчика до емкости h . Поперечные размеры кюветы превосходили размеры датчика D , что соответствовало модели плоскостройной среды (среда 3 - оргстекло, среда 1 - песок, среда 2 – жидкость). Расстояние h , при котором сдвиг резонансной частоты равен $10 \cdot \Delta f_{ноэр} = 100 \text{кГц}$, назовем глубиной зондирования датчика $h_{зонд}$, где $\Delta f_{ноэр} = 10 \text{кГц}$ – точность измерения частоты в эксперименте. При таком определении $h_{зонд}$ зависит как от параметров самого датчика, так и от параметров исследуемой среды. На рис. 4.7 представлены данные измерений резонансной частоты датчика с $D = 9 \text{мм}$ и собственной резонансной частотой в вакууме $f_0 = 381 \text{МГц}$ в зависимости от глубины h залегания неоднородности в песке с тремя степенями влажности: 0%, 7% и 10%.

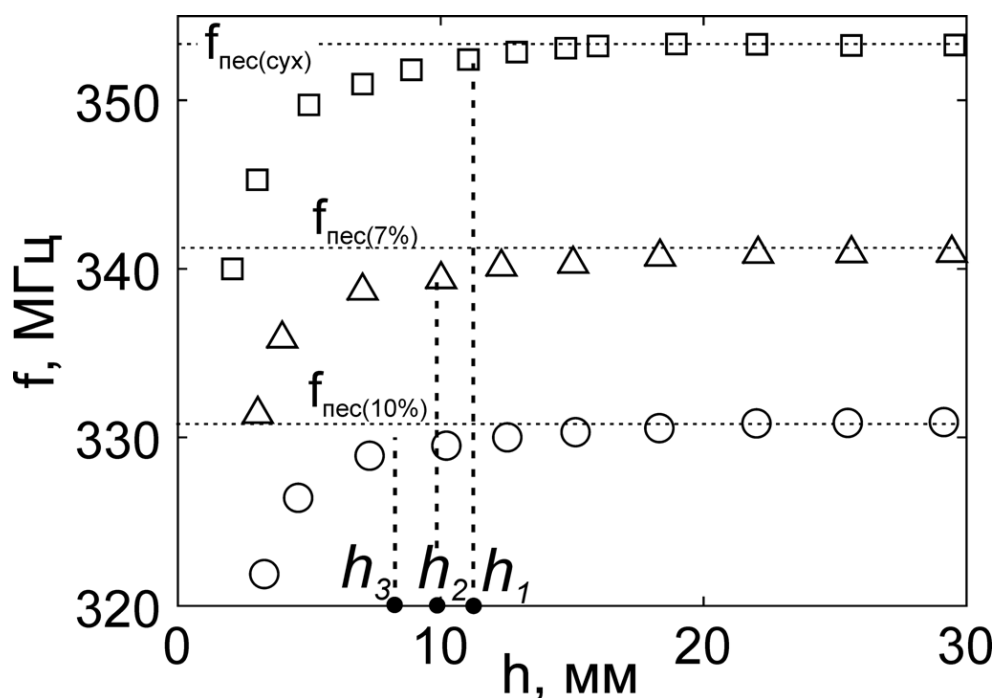


Рис. 4.7 Зависимость резонансной частоты от расстояния h датчика с базой $D=9\text{мм}$ и собственной резонансной частотой в вакууме $f_0=381\text{МГц}$ до кюветы с жидкостью, окруженной песком: «□» – сухой песок, «Δ» и «О» – влажный песок, влагосодержание по массе 7% и 10%, соответственно. Пунктиром обозначена резонансная частота при максимальном удалении кюветы от датчика.

При непосредственном контакте датчика с кюветой сдвиг резонансной частоты максимален, при этом резонансная частота датчика составляла $230,3\text{МГц}$ при $h=0$ для всех трех кривых на рис. 4.7. В процессе увеличения глубины залегания жидкости сдвиг сначала резко уменьшался, а затем подчинялся более плавному закону изменения с выходом на постоянное значение $f_{\text{пес}}$, соответствующее полубесконечному пространству, заполненному песком и зависящее от его влажности. Отсюда, по сдвигу резонансной частоты $\Delta f = f_0 - f_{\text{пес}}$ и изменению амплитуды из (1.25) и (1.26) с учетом (1.27) определялась эффективная диэлектрическая проницаемость измерительной части датчика $\varepsilon_{\text{эфф}}$ и песка $\varepsilon_{\text{песка}} = 2 \cdot \varepsilon_{\text{эфф}} - \varepsilon_3$. В таблице 4.1 представлены значения $\varepsilon_{\text{песка}}$ и глубины зондирования датчика с расстоянием между проводами $D=9\text{мм}$ в зависимости от влагосодержания pH песка.

Таблица 4.1.

Влагосодержание песка pH (по массе)	0%	7%	10%
Комплексная диэлектрическая проницаемость песка $\epsilon_{песка}$	3.02 - 0.03j	5.74 - 0.19i	7.18 - 0.26i
Глубина зондирования h_{zond}	11.3 мм	9.9 мм	8.3 мм

Из таблицы 4.1 видно, что h_{zond} уменьшается с ростом влагосодержания. Для более детального изучения влияния влажности на h_{zond} был проведен численный расчет максимальной глубины зондирования в зависимости от расстояния D между проводами датчика для объекта с $\epsilon = 81 - 10j$ (кювета с водой) в песке с влажностью $pH = 0\%$, 7% и 10% (рис. 13). Математическое моделирование проводилось в соответствии с (25-27). С увеличением влажности песка, наблюдается уменьшение глубины зондирования, поскольку с ростом влагосодержания уменьшается «контрастность» между объектом и средой, т.е. $\epsilon_{песка}$ приближается к $\epsilon_{воды}$.

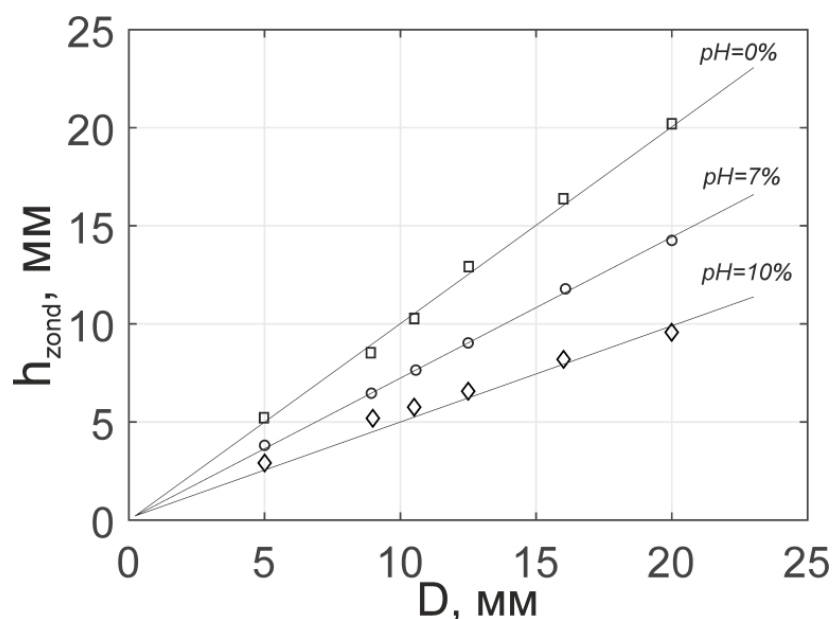


Рис. 4.8 Численный расчет максимальной глубины зондирования в зависимости от расстояния между проводами для объекта с $\epsilon = 81 - 10j$ (вода) в песке с влажностью $pH = 0\%$, 7% и 10%

Из рис. 4.8 видно, что глубина зондирования h_{zond} по порядку величины совпадает с расстоянием между проводами датчика D , а при нулевой влажности равна ей. Назовем D «базой» датчика.

4.5.2 Определение поперечных границ водоносного слоя

Для определения горизонтальных размеров неоднородности, датчик с глубиной зондирования $h_{zond}=20\text{мм}$ перемещался вдоль поверхности раздела сред в направлении перпендикулярном измерительным проводам. Кювета была расположена на глубине 3 мм от верхней границы песка. При этом фиксировался сдвиг резонансной частоты в зависимости от положения центра датчика (рис. 4.9).

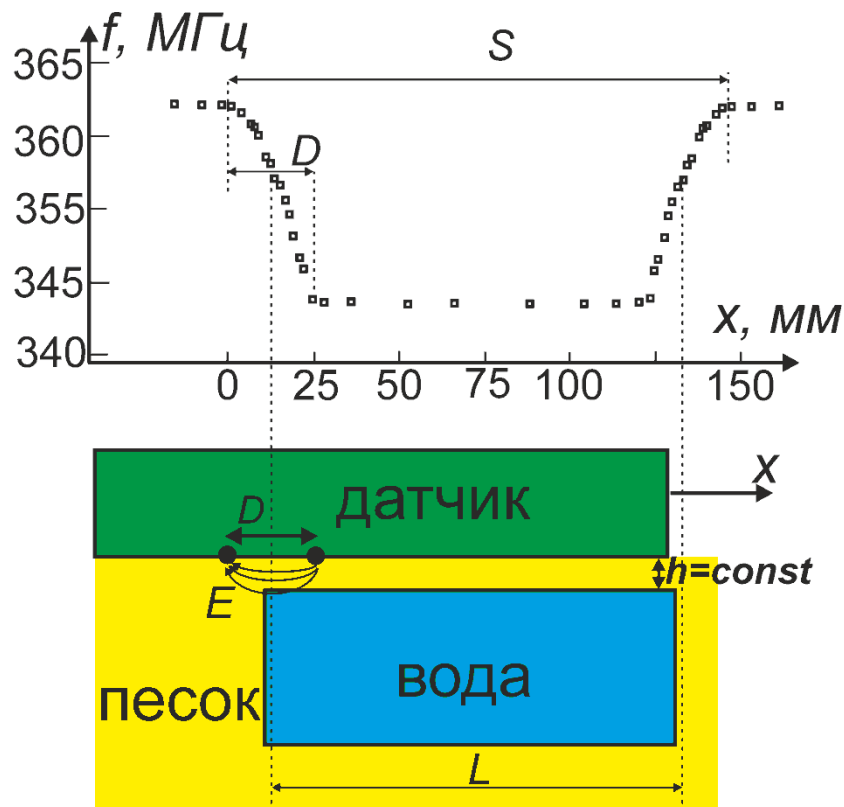


Рис. 4.9 Зависимость резонансной частоты от горизонтальной координаты x датчика с базой $D=20\text{мм}$ вдоль неоднородности размером $L=150\text{мм}$, расположенной в песке на расстоянии $h=3\text{мм}$. $S=170$ – характерный масштаб изменения частоты равный $L+D$. Линии зондирующего квазистатического электрического поля E изображены схематично

Когда датчик находился далеко от кюветы, частота не менялась и соответствовала модели двухслойной среды с эффективной диэлектрической проницаемостью

$\epsilon_{эфф} = \frac{\epsilon_{оргст} + \epsilon_{песка}}{2}$. При нахождении части датчика над объектом, когда один из проводов

пересекал линию границы неоднородности, частота уменьшалась. Когда датчик находился целиком над неоднородностью, частота не изменялась. Таким образом, при сканировании датчиком вдоль границы раздела наблюдалась «ямка» - уменьшение резонансной частоты в области неоднородности. Данная зависимость частоты от координаты x позволяет определить поперечный размер кюветы L по этой координате как разность между характерной областью изменения частоты S на графике $f(x)$ и расстоянием между проводами D : $L = S - D$. Получившийся размер кюветы немного превышает истинный размер из-за наличия краевого эффекта.

4.5.3 Определение глубины залегания водоносного слоя

Имея априорную информацию о глубине залегания водоносного слоя h с известной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{\text{воды}} = 81 - 10j$, можно восстановить h . Для этого датчики с глубиной зондирования h_{zond} , удовлетворяющей условию $h_{\text{zond}} > h$, устанавливались над плоской частью неоднородности (рис. 4.10), при этом фиксировалась частота и амплитуда резонанса в зависимости от базы D для пяти датчиков с $D = 5, 9, 10.5, 12.5, 16, 20$.

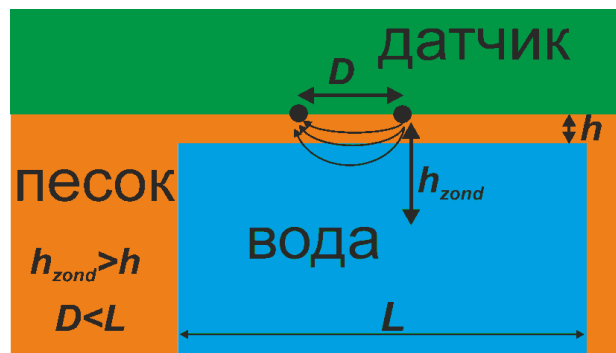


Рис. 4.10 Схема эксперимента по определению глубины залегания неоднородности

В этом случае среду можно рассматривать как двухслойную и использовать соотношения (1.25)-(1.27) для решения обратной задачи. По сдвигу резонансной частоты и изменению амплитуды находилась эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{\text{эфф}}$ для каждого датчика. Экспериментально измеренные значения действительной и мнимой части $\varepsilon_{\text{эфф}}$ изображены на рис. 4.11 символами «□» и «Δ», соответственно.

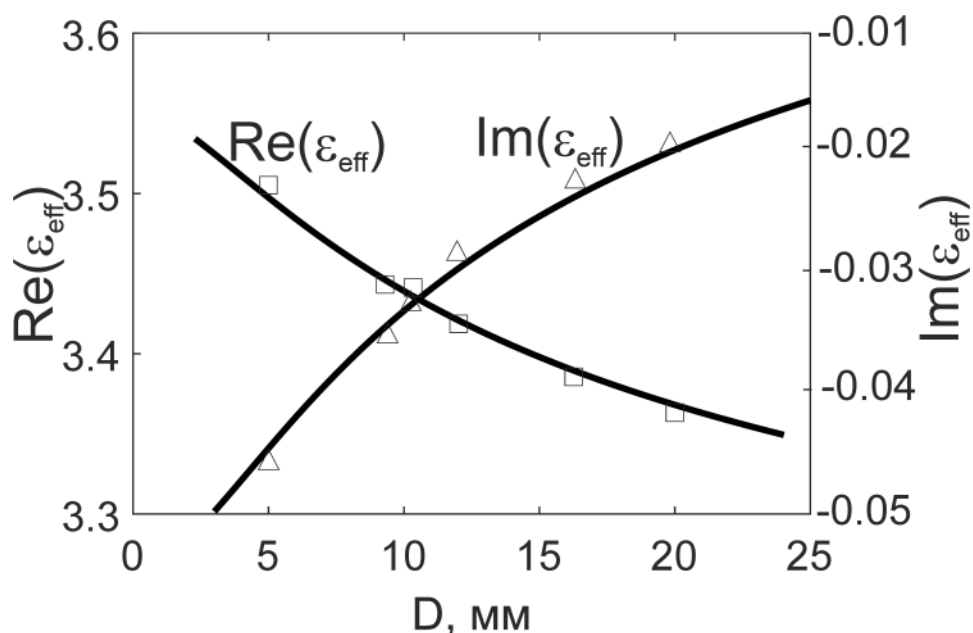


Рис 4.11 Измеренные значения действительной $\text{Re}(\varepsilon_{\text{эфф}})$ (□) и мнимой $\text{Im}(\varepsilon_{\text{эфф}})$ (Δ) части эффективной диэлектрической проницаемости кюветы с жидкостью, расположенной в сухом песке на расстоянии $h=5\text{мм}$ от датчика с базой D , зафиксированного на оргстекляной подложке. Комплексное значение $\varepsilon_{\text{эфф}}$ восстанавливалось по сдвигу максимума резонансной кривой и изменению амплитуды резонанса. Сплошная кривая – теоретический расчет по формуле (18) для восстановленной глубины h .

Расстояние h не выражается формулой в явном виде. Данный параметр находился путем минимизации целевой функции F с помощью модифицированного симплекс-метода Неллера-Мида, реализованного в качестве готового алгоритма в среде программирования Matlab R2015a. Целевая функция F представлялась в виде среднеквадратичного отклонения между экспериментальными значениями $\varepsilon_{\text{эфф}}^{\text{эксн}}$ и теоретически рассчитанными $\varepsilon_{\text{эфф}}^{\text{теор}}(h, D)$ по (2.18) при известных параметрах $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$:

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{\text{эфф}}^{\text{эксн}}(D_i) - \varepsilon_{\text{эфф}}^{\text{теор}}(h, D))^2$$

Перед началом процедуры минимизации целевой функции выбирались начальные приближения для диэлектрической проницаемости и расстояния h , близкие к истинным. Для нахождения одного параметра h в принципе достаточно одного датчика, однако, для уменьшения погрешности измерения количество датчиков в эксперименте было увеличено до 5. Сплошная кривая на рис. 4.10 соответствует теоретической зависимости, рассчитанной по формуле (4.6) для найденного значения h . В таблице 4.2 приведены

восстановленные значения h при различной влажности песка. В каждом столбце сверху указано истинное значение искомого параметра $h_{ист}$.

Таблица 4.2

$h_{ист}$ \ рН	2	3	4	5
0%	2.05	2.85	4.05	5.1
7%	2.1	3.13	3.9	4.88
10%	2.14	3.2	4.18	5.2

Из таблицы 4.2 видно, что отклонение между экспериментальными результатами и реальными параметрами глубины залегания не превышает 20%. Из экспериментальных данных следует, что при увеличении влажности песка, в среднем растет ошибка определения h вследствие уменьшения «контрастности» между объектом (вода) и средой (влажный песок).

4.5.4 Определение расстояния до верхней границы неоднородности и ее диэлектрических свойств

Строение водоносных горизонтов разнообразно. Они могут быть составлены из осадочных разрыхленных пород, остатков извержений плотной лавы с трещинами, пористых песчаников, известняков и т.д. Моделирование поиска водных слоев путем замены неоднородной в пространстве смеси из воды и всевозможных грунтовых пород на полость с водой (как в предыдущем пункте) не совсем корректно. Для практического применения метода ближнеполюсного СВЧ-зондирования почвогрунтов целесообразно моделировать водоносный слой водонасыщенным образцом из песка или мелкого гравия, тем самым уменьшая контрастность по комплексной диэлектрической проницаемости слой/среда и не использовать априорную информацию о диэлектрической проницаемости слоя. В то же время, развитая методика позволяет восстанавливать не только глубину залегания слоя в среде, но и его электродинамические параметры $\varepsilon' - j \cdot \varepsilon''$. Для демонстрации этого был проведен эксперимент по определению комплексной диэлектрической проницаемости, глубины залегания и поперечных размеров инородных включений в виде прямоугольных параллелепипедов в песке, содержащих песчано-водную смесь. Процедура восстановления свойств неоднородностей аналогична

вышеприведенной, однако, теперь неизвестными параметрами являются глубина залегания и комплексная диэлектрическая проницаемость объекта.

Таблица 4.3

$\varepsilon_1(\text{песок})$	Истинные значения				Измеренные значения			
	ε_2 (водно-песчаная смесь: 70% песка, 30% воды)	h , мм	Lx , мм	Ly , мм	ε_2	h , мм	Lx , мм	Ly , мм
3.02 - 0.03j (сухой)	27-11j	3	100	50	30-10j	3,2	105	53
5.74 - 0.19i (влажный, рН=7%)								

В таблице 4.3 приведены восстановленные и истинные параметры неоднородности, расположенной в песке на различных расстояниях h от датчика. Получившиеся значения отличаются от реальных не более чем на 10%. Удовлетворительная точность измерений обусловлена в первую очередь большим контрастом между средой и объектом.

Таким образом, в модельном эксперименте продемонстрирована принципиальная возможность применения метода резонансной ближнеполевой СВЧ-томографии для подповерхностного зондирования поглощающих сред. Вопросы точности измерений и чувствительности резонансной системы при слабом контрасте неоднородностей и большой влажности почвы остаются за рамками данной диссертации и в ближайшем времени станут предметом детального исследования. Наиболее перспективными задачами в данном направлении можно считать определение толщи льда, обнаружение в грунте локализованных полостей искусственного и природного происхождения, имеющих сильный контраст с почвой по диэлектрическим свойствам. Не менее актуальны задачи в медицинских приложениях по определению образований в биологических тканях.

4.6 Выводы

В данной главе диссертации продемонстрировано развитие метода резонансной ближнепольной СВЧ-томографии для подповерхностного зондирования неоднородных сред и показана возможность решения обратной задачи по восстановлению внутренней структуры объектов на примере зондирования проводящих сред с пространственно-локализованными неоднородностями.

Суть метода резонансной ближнепольной СВЧ-томографии заключается в измерении импеданса ближнепольных антенн, включенных в качестве нагрузки в резонатор. По сдвигу резонансной частоты и изменению добротности можно восстановить диэлектрическую проницаемость и проводимость среды вблизи антенного устройства. Глубина зондирования антенны определяется размером ее апертуры. Перемещая вдоль поверхности объекта систему датчиков с разной апертурой (глубиной зондирования), можно, в принципе, восстановить внутреннюю структуру среды. В общем случае решить обратную задачу по восстановлению внутренней структуры среды невозможно без априорной информации о ее свойствах. Однако, если глубинный профиль диэлектрической проницаемости среды имеет ступенчатый характер, решение задачи упрощается.

В качестве демонстрации метода резонансной ближнепольной СВЧ-томографии применительно к задаче поиска водоносных слоев в грунте проведен эксперимент по нахождению диэлектрических и геометрических параметров неоднородности на модельной среде – полости с водой во влажном песке. Измерительная система представляла собой пять резонансных датчиков с ближнепольными антеннами на отрезках двухпроводной линии с расстоянием между проводами $D = 5, 9, 10.5, 12.5, 16, 20$ мм, определяющим глубину зондирования датчика h . Экспериментально продемонстрировано, что h , зависит как от D , так и от свойств среды, и уменьшается с увеличением влажности песка. Проведено численное моделирование зависимости $h(D)$ при трех влажностях песка и показано, что $h \approx D$ только в сухом песке.

Изучаемые неоднородности в виде полости с водой удовлетворяли ряду требований: длина неоднородности превышала характерный масштаб локализации поля измерительной ёмкости датчиков, а его толщина и глубина залегания были такими, что зонды не чувствовали нижнюю границу неоднородности. При расположении зондов над центральной областью полости с жидкостью можно было использовать модель двухслойной среды. С использованием априорной информации о том, что неоднородность удовлетворяет указанным требованиям, приведен упрощенный алгоритм решения

обратной задачи, найдена диэлектрическая проницаемость объектов, глубина их залегания и геометрические размеры. Отклонения между восстановленными и истинными параметрами не превышали 10%. В качестве демонстрации возможностей предлагаемого метода проведен аналогичный эксперимент с полостью, заполненной песчано-водной смесью (состав по массе 70/30) в песке различной влажности (0 и 7% влагосодержания по массе) и показано, что даже в условиях малого диэлектрического контраста метод резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования позволяет найти параметры неоднородности.

ПРИЛОЖЕНИЕ. РАЗРАБОТКА ДАТЧИКА ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ДЛЯ МИКРОСПУТНИКА «ТРАБАНТ»

Спутниковые наблюдения, являющиеся мощным инструментом диагностики ионосферной плазмы, в настоящее время требуют все более точных и высокоинформативных приборов. Изучение структуры ионосферы и явлений, влияющих на ее состояние, важно как для понимания физики протекающих в ней процессов, так и для решения разнообразных радиофизических задач.

Несмотря на большое количество методик измерения концентрации лабораторной плазмы, соответствующих спутниковых локальных диагностик не так много. В первую очередь это связано со спецификой ионосферных условий, низкими значениями концентрации плазмы, стоимостью и массогабаритными параметрами научной аппаратуры.

Спутниковые локальные методы подразделяются на три основные группы: зонд Ленгмюра и его модификации; плоские ионные ловушки (цилиндры Фарадея) и их модификации; сферические ионные ловушки и их модификации. Все эти группы включают многочисленные модификации по типам и методике измерений.

Метод зонда Ленгмюра позволяет одновременно измерять концентрацию и температуру электронов ионосферной плазмы. В рамках данного метода электрический зонд шаровой, цилиндрической или плоской формы, вводится в плазму. Прикладывая к зонду переменный потенциал относительно корпуса спутника снимается его зондовая характеристика, по характеру которой определяется электронная концентрация и температуры [102]. Зонды Ленгмюра, благодаря их относительной простоте изготовления, использовались в 1960-1970 гг. в СССР как на спутниках («Космос-378», «Интеркосмос -2, -4, -8, -10, -19»), так и в экспериментах при вертикальных пусках ракет по программе «Интеркосмос» («Вертикаль -4, -6, -10») на спутнике Demeter [103-115] для измерений концентрации и температуры электронов.

Однако метод зонда Ленгмюра применительно к ионосферной плазме отягощен сложностью теоретического описания, обусловленного наличием целого ряда факторов, влияющих на ВАХ зонда. Для интерпретации зондовых измерений необходимо учитывать скорость образования области нарушения квазинейтральности вблизи поверхности зонда, структура которой зависит от геометрических размера зонда, потенциала спутника, материала поверхности, скорости движения спутника, энергии заряженных частиц. Существенное влияние на ВАХ зонда оказывает магнитное поле Земли [116, 117]. Это проявляется в образовании отрицательных участков на зондовых характеристиках в

области насыщения электронных токов. Отрицательные участки наблюдаются при величинах концентрации электронов порядка 10^3 см^{-3} и напряженности вертикальной составляющей магнитного поля $B \geq 0.5 \text{ Гс}$. Вычисление концентрации плазмы при наличии отрицательных участков зондовых характеристиках на участке насыщения электронов невозможно. Преодолеть эту трудность можно путем уменьшения размеров зонда с целью увеличения отношения ларморовского радиуса электронов к радиусу зонда [104-108]. Однако уменьшение площади собирающей поверхности зонда требует увеличения чувствительности и стабильности аппаратуры по измерению тока до значений порядка нескольких десятков наноампер. Именно это положение не позволяет использовать зонды Ленгмюра на микро- и нано- спутниках в силу их малых габаритов и соответственно недостаточной площади собирающей поверхности.

Среди традиционных методов измерения плотности и температуры околоземной плазмы стоит отметить метод измерения взаимного импеданса между двумя антеннами (MIP) [110-115, 118-124]. По форме кривой зависимости импеданса от частоты можно восстановить плазменную частоту и емкость двойного слоя вблизи антенны, которые определяют концентрацию и температуру электронной компоненты плазмы.

Метод активного зондирования параметров плазмы по резонансному отклику успешно реализован французскими учеными на приборе Whisper в составе научной аппаратуры [125]. Измеряемые значения концентрации лежат в диапазоне 0.2-80 см⁻³. Как и все активные методы, данный метод непригоден для совместного использования с другими диагностиками при мониторинге параметров плазмы, поскольку вносит существенные помехи в работу спутниковой аппаратуры. Помимо этого, из большой апертуры антенны 80 м данный метод неприменим для микро- и нано- спутников массы которых ограничены, соответственно, 50 и 10 кг. Применяемая методика уникальна в своем роде и не нашла широкого применения в мировом опыте спутниковых измерений.

Много работ посвящено измерениям ионного состава космической плазмы. Для выполнения этих целей современные спутники оснащены анализатором частиц [126-142]. Однако данное оборудование обладает высокой стоимостью, большим энергопотреблением и массогабаритными характеристиками.

Разработка нового поколения аппаратно-программных диагностических систем предназначенных для мониторинга ионосферной концентрации и ее неоднородностей на борту спутника, обладающих высоким пространственно-временным разрешением и чувствительностью актуальна для изучения физики ионосферы, а так же для решения множества прикладных задач. Спутниковые наблюдения, являющиеся мощным инструментом диагностики ионосферной плазмы, в настоящее время требуют все более

точных и высокоинформативных приборов. Изучение структуры ионосферы и явлений, влияющих на ее состояние, важно как для понимания физики протекающих в ней процессов, так и для решения разнообразных радиофизических задач.

Высокое пространственно-временное разрешение измерения концентрации ионосферной плазмы, а так же широкий спектральный диапазон регистрации ее флуктуаций имеют высокую научную значимость для глобального мониторинга ионосферной плазмы. Использование данного класса аппаратуры в спутниковых экспериментах позволит накопить массив данных с достаточным глобальным и временным перекрытием для различных гео/гелиофизических условий, которые важны в научных исследованиях для углубления фундаментальных знаний о физике процессов в ионосфере.

Ионосфера реагирует не только на внешние солнечное и космическое воздействия, но и на внутренние, происходящие в тропосфере и на поверхности Земли. Основной научной задачей, для решения которой будет использован датчик параметров плазмы (ДПП), является исследование влияния ряда внутренних и внешних факторов на ионосферные процессы, а именно:

- влияние искусственного (man made) электромагнитного излучения (это мощное излучение СДВ-станций и излучение промышленных линий электропередач);
- влияние молниевых процессов
- влияние сейсмо и вулканической деятельности Земли
- шумановский резонанс
- влияние солнечной активности на параметры плазмы и волновые процессы в ионосфере на высотах полета спутника «Трабант»
- исследование суточных и сезонных вариаций плотности плазмы и волновых возмущений, вызванных регулярно действующим источником большой энергии – солнечным терминатором.
- влияние космической пыли на состояние ионосферы, которая ежегодно в определенное время, попадает на Землю из хвоста комет.

Описание датчика параметров плазмы

ДПП представляет собой моноблок электроники – блок обработки сигналов (БОС), резонансную измерительную систему (РИС) и внешние соединители для подключения БОС к РИС и к электрической кабельной сети микроспутника. Электроника изделия БОС монтируется на печатной плате и состоит из блока сбора данных (БСД), узла измерения (УИ) и генераторного блока (ГБ). На рис. П1 приведена структурная схема ДПП.

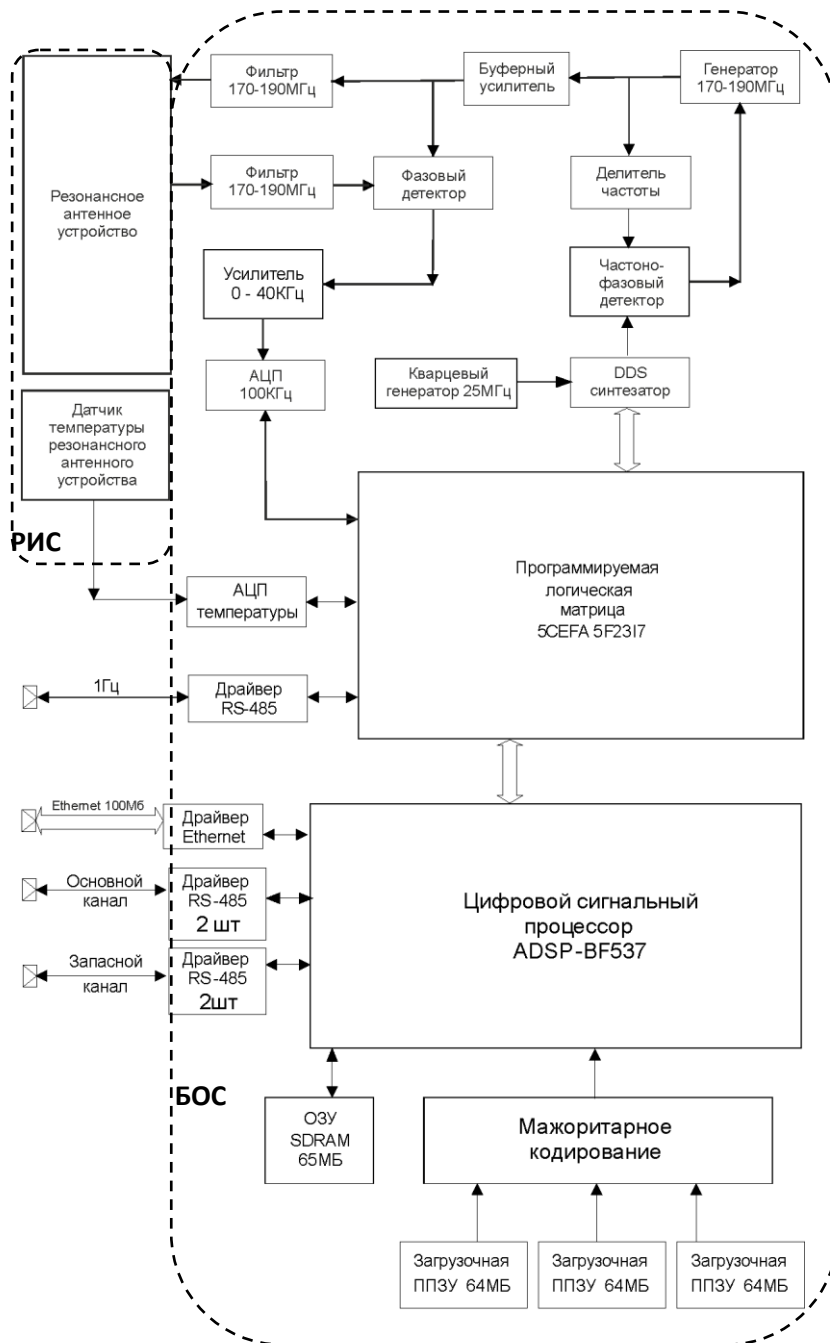


Рис. П.1 Структурная схема ДПП. РИС – резонансная измерительная система. БОС – блок обработки сигналов

Резонансная измерительная система

Резонансная измерительная система включает в себя резонатор, датчик температуры резонатора, узел раскрытия. Внешний вид изделия в транспортном состоянии приведен на рис. П.2.



Рис. П.2 Внешний вид резонансной измерительной системы (трехмерное моделирование в системе AUTOCAD): слева – в транспортном (сложенном) состоянии, справа – в рабочем положении.

В основе разработки датчика параметров плазмы для микроспутника «Трабант» (ДПП-Т) лежит оригинальный метод диагностики локальных значений электронной концентрации лабораторной плазмы низкого давления и ее флуктуаций, предложенный в 1976г. в работе [42]. Идея, положенная в его основу заключается в измерении собственной частоты миниатюрного резонатора (СВЧ-зонда), помещённого в плазму. Для локальных измерений плотности плазмы используется простейший и наименьший по размерам резонатор, которым является четвертьволновый отрезок двухпроводной линии, замкнутый на одном и разомкнутый на другом конце. Собственная частота резонатора зависит от диэлектрической проницаемости плазмы ϵ . По величине резонансной частоты однозначно восстанавливается значение плотности плазмы. Диагностическая система может работать, когда собственная частота резонатора с плазмой значительно больше плазменной частоты. В этом случае ($\omega_{res} \gg \omega_{pe}$) моды плазменных колебаний, которые могут возбуждаться в теплой плазме, подавляются затуханием Ландау и поэтому не влияют на результаты измерений. В сравнении с традиционно используемыми ленгмюровскими зондами, показания СВЧ-зонда в линейном режиме определяются только плотностью плазмы и не зависят от электронной температуры.

Методика резонансного СВЧ-зонда в прямом виде для диагностики ионосферной плазмы не применима. Проектирование аналогичной диагностики для установки на спутники Земли для измерения концентрации ионосферной плазмы от 10^3 до 10^6 см^{-3} (соответствует высотам 400-500 км) потребует создание антенны-резонатора длиной порядка 15 м с собственной резонансной частотой порядка 5 МГц. Такая измерительная

система будет иметь значительную массу и габариты, что существенно сузит область ее применения. В частности это не позволит ее использовать на борту микро-спутников.

Для измерения концентрации ионосферной плазмы от 10^3 до 10^6 см⁻³ предполагается уменьшить габариты резонатора путем перехода на высокие частоты порядка 200 МГц. На таких частотах изменения резонансной частоты в диапазоне концентраций от 10^3 до 10^6 см⁻³ у такой системы будут в пределах 300кГц, что при добротности резонатора порядка 200 не будет выходить за ширину линии собственного резонанса. Минимальному значению измеряемой концентрации плазмы (10^3 см⁻³) будет соответствовать сдвиг резонансной частоты порядка 200 Гц. Малые смещения резонансной частоты при наличии плазмы относительно вакуумной будут регистрироваться посредством амплитудно-фазового метода, подробно описанного во второй главе диссертации.

Резонатор представляет собой распределенную резонансную систему в виде четвертьволнового отрезка двухпроводной линии, закороченной на одном конце и разомкнутой на другом (рис. П.3). Расстояние между проводами 5 см, материал – медная трубка диаметром 10 мм. Собственная резонансная частота системы порядка 180 МГц, добротность $Q = 350$. Возбуждение резонатора и прием его отклика осуществляется с помощью петель магнитной связи вблизи закороченного конца. В качестве демпфера акустических колебаний проводов резонатора, выступает диэлектрическая пластина из фторопласта, жестко закрепленная с проводами в центральной части резонатора.

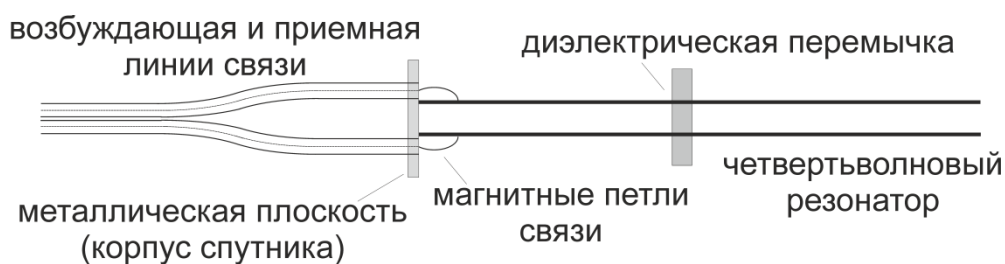


Рис. П.3 Схема резонансного измерительного устройства для измерения концентрации плазмы на борту микроспутника «Трабант». Собственная резонансная частота резонатора в вакууме $f_0 = 180$ МГц

Узел раскрытия предназначен для выведения РИС из транспортного (сложенного) в рабочее положение. Узел раскрытия представляет собой подвижное шарнирное соединение на котором закреплен резонатор. Раскрытие осуществляется при помощи пружинного механизма. После раскрытия положение резонатора фиксируется механическим фиксатором.

Важно отметить, что в ионосферных условиях необходимо учитывать температуру резонатора, вариации которой из-за солнечного излучения приводят к изменению собственной его резонансной частоты вследствие температурного расширения материала резонатора. Этот эффект необходимо учитывать при регистрации малых сдвигов резонансной частоты системы. Относительное изменение длины l резонатора при изменении его температуры T на 1°K определяется коэффициентом линейного теплового расширения $\alpha = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}$. Учитывая, что $\omega_0 = \frac{\pi c}{2l}$ нетрудно получить выражение для

температурной коррекции ω_0 :

$$\omega_0(T) = \omega_0(T_0) \left(1 - \alpha \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \right), \quad (\text{П.1})$$

где $\omega_0(T_0)$ - собственная резонансная частота датчика при температуре T_0 . Для определения температуры резонатора с целью дальнейшей коррекции измерений концентрации плазмы в ионосферных условиях планируется использовать термопару, контактирующую с проводами резонатора.

Электродинамическая модель датчика, связывающая выходной сигнал с измерительной системы и концентрацию плазмы, развита в первой главе диссертации. Используем полученные результаты для нахождения амплитудно-фазовой характеристики с учетом температурной зависимости собственной резонансной частоты системы:

$$U_{faz} = \frac{U_0}{\sqrt{Q_0^2 \left(\Delta\varepsilon - 2\alpha \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \right)^2 + 1}} \sin \left(\frac{1}{2} Q_0 \left[\Delta\varepsilon - 2\alpha \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \right] \right) \quad (\text{П.2})$$

Применяя разложение в ряд Тейлора входящих в (П.18) величин, в первом порядке малости получаем:

$$U_{faz} = U_0 \left(\frac{1}{2} Q_0 \left[\Delta\varepsilon - 2\alpha \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \right] \right) \quad (\text{П.3})$$

Выражение для концентрации при этом принимает вид:

$$N = \left[\frac{U_{faz}}{U_0 Q} + 2\alpha \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \right] \frac{m\omega_0^2}{2\pi e^2} \quad (\text{П.4})$$

Таким образом, найдена связь между концентрацией и выходным сигналом с резонатора с учетом тепловых поправок. Представленные выше выкладки относятся к стационарной плазме.

Наличие в плазме колебаний электронной концентрации $\delta N(t)$ приведет к появлению амплитудной модуляции величины U_{faz} (рис. П.4). В силу линейной зависимости $N(U_{faz})$, в соответствии с (П.4) нетрудно получить связь величины амплитудной модуляции δU_{faz} с возмущениями концентрации $\delta N(t)$:

$$\delta N = \frac{1}{U_0 Q} \frac{m \omega_0^2}{2 \pi e^2} \delta U_{faz} \quad (\text{П.5})$$

Ограничения по регистрации нестационарных возмущений концентрации плазмы связаны с характерным временем возмущения T , величина которой должна быть больше времени затухания колебаний в резонаторе $\frac{Q}{\omega_0}$.

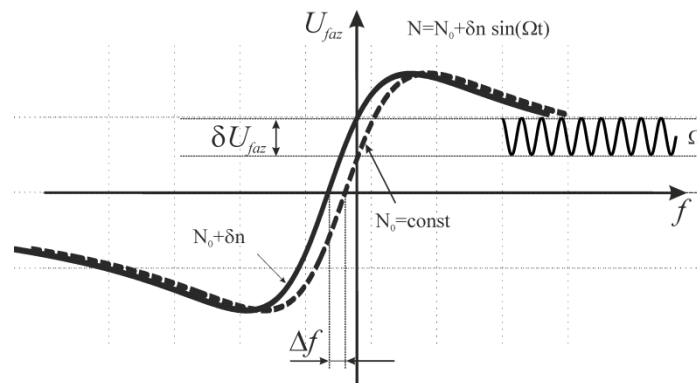


Рис. П.4 Иллюстрация методики регистрации нестационарной компоненты концентрации плазмы на примере гармонических возмущений. U_{faz} - выходной сигнал с измерительной системы при использовании амплитудно-фазовых измерений. $\delta n \times \sin(\Omega t)$ - возмущения плазмы. Флуктуация резонансной частоты приводит к амплитудной модуляции выходного сигнала

Блок обработки сигналов

Блок обработки сигналов БОС представляет собой моноблок с электрическими соединителями. Внешний вид изделия приведен на рис. П.5.

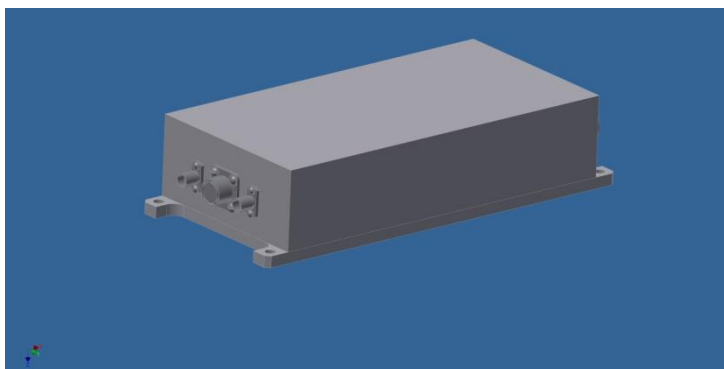


Рис. П.5 Внешний вид БОС (трехмерное моделирование в системе AUTOCAD)

БОС выполнен в виде моноблока, состоящего из жесткой рамочной конструкции, стянутой по периметру винтами, на которой находится многослойная печатная плата (МПП) с электронными модулями функциональных узлов БОС. Трассы функциональных узлов выходят на внешние соединители. Установочная поверхность модуля является одновременно основной теплоотводящей поверхностью, на которую крепятся металлические корпуса вторичных источников питания. Сверху рамочная конструкция закрывается монолитной металлической крышкой. Стенки корпуса изделия должны быть толщиной не менее 4 мм. Выбор толщины стенок корпуса БОС определяется требованиями к радиационной стойкости в условиях эксплуатации изделия. Для выполнения требований по электромагнитной совместимости и устойчивости к электростатическим разрядам корпус БОС изготовлен из немагнитных материалов. В качестве материала корпуса выбран сплав АМг6 с покрытием Хим.Окс.Э. Этот материал широко используется в бортовых приборах и имеет повышенную устойчивость к воздействиям магнитных полей и электростатических разрядов, а также обеспечивает низкий уровень излучаемых БОС электромагнитных помех. Конструкция БОС оптимизировалась с учетом требований к габаритным размерам и массе. Электрические соединители БОС предназначены для подключения к кабельной сети микроспутника и приборов научной аппаратуры, а также для технологических целей.

Для обеспечения питания БОС необходимо 4 источника питания: +3.3 В для питания цифровой части модуля; +1.2В для дополнительного питания ПЛИС; +2.5 В для питания АЦП; +3.0 В для питания аналоговых цепей; +12 В для питания генераторной части модуля. Все источники питания выполнены на основе микросхемы импульсного преобразователя типа ST1S10PUR и питаются от входного напряжения +12 В.

Оцифровка входного широкополосного сигнала производится со скоростью 96 КВыборок/с. В приборе используется 24-разрядный АЦП. Для записи сигнала в высокочастотном диапазоне до 40 КГц, используется преобразование Фурье длиной 1024

отсчета с дальнейшим непрерывным энергетическим экспоненциальным накоплением около 1 с. При этом отсчеты мощности по частоте входного сигнала производятся один раз за период накопления. Высокочастотный сигнал в частотной области должен записываться непрерывно и потребует памяти у БНК примерно 195МБ/сутки. Для записи сигнала в низкочастотном диапазоне до 400Гц, используется цифровое прореживание в 128 раз до частоты 750 Гц. При этом динамический диапазон увеличивается примерно на 20 дБ. Низкочастотный сигнал должен записываться непрерывно и потребует памяти у БНК примерно 195МБ/сутки.

Для БОС предполагается использование сигнального процессора ADSP-BF537, фирмы Analog Devices. Процессор имеет встроенный загрузчик для загрузки извне бортового программного обеспечения, 2 контроллера приема последовательных сигналов со старт-стопной системой синхронизации, реализующие 2 канала по стандарту RS-485, контроллер последовательного интерфейса по стандарту «Fast Ethernet», охранный таймер для предотвращения сбоев при выполнении программ. Процессор выполняет следующие функции: организация приема цифровых сигналов с высокочастотного АЦП; организация приема цифровых сигналов с датчика температуры; организация приема и транслирования синхрометки «1с».

В качестве программируемой логической матрицы (ПЛИС) выбрана микросхема 5CEFA5F23I7, производства фирмы «Altera». ПЛИС выполняет следующие функции: организация приема цифровых сигналов с высокочастотного АЦП; организация приема цифровых сигналов с датчика температуры; организация приема и транслирования синхрометки «1с». Использование ПЛИС для реализации перечисленных функций позволяет уменьшить число интерфейсных микросхем и, как следствие существенно снизить габариты устройства и повысить надежность изделия в целом. ПЛИС может осуществлять первичную обработку сигналов с датчика плазмы. Это ведет к снижению требований к производительности процессора БОС.

При построении модуля запоминающего устройства в БОС используется 3 микросхемы FLASH-памяти MT25QL128ABA1ESE-MSIT. Для каждой из них предусмотрено независимое управление. Микросхема FLASH-памяти MT25QL128ABA1ESE-MSIT объемом 128МБ обладает следующими отличительными особенностями: температурный диапазон промышленного уровня (-40°C - +85°C); отсутствие аналогов отечественного производства (ближайший аналог обладает объемом памяти ниже на несколько порядков); одноуровневые ячейки памяти (SLC) обеспечивают более высокую надежность хранения информации. На микросхемах стандартной логики организовано мажоритарное включение микросхем по принципу «2 из 3» непосредственно

при начальной загрузке процессора после включения питания. Кроме этого в рабочем режиме (или в режиме диагностики) все 3 микросхемы можно подключить в режиме полного доступа (чтения и записи) и, при сбое памяти в одной из них, восстановить правильную информацию. При этом функции мажоритарного кодирования берет на себя управляющий процессор. В качестве оперативной памяти используется микросхема MT48LC16M16A2FG-75IT, предназначенная для жестких условий эксплуатации, объемом 64 мегабайта.

Генераторный блок представляет собой генератор управляемый напряжением с системой фазовой автоподстройки частоты. Диапазон изменения частоты составит 170-190 МГц, выходная мощность – порядка 5dbm. Генераторный блок служит источником высокочастотных колебаний для резонансной измерительной системы ДПП. В качестве генератора управляемых напряжений будет использована микросборка jtos 300. В систему фазовой автоподстройки входит делитель частоты с коэффициентом деления 64, частотно-фазовый детектор и опорный генератор, выполненный на микросхеме AD9832, представляющая собой синтезатор частот прямого цифрового синтеза (DDS синтезатор). Источник тактовой частоты для DDS синтезатора служит генератор с кварцевым резонатором с выходной частотой 25МГц. Управляющие коды работой DDS синтезатора формирует ПЛИС.

Фазовый детектор будет выполнен на микросхеме ADE2+, генерирующей СВЧ-сигнал в диапазоне 5-1000МГц. По напряжению на выходе фазового детектора будет регистрироваться изменение резонансной частоты РИС в зависимости от изменения концентрации плазмы.

Лабораторное макетирование резонансного измерительного устройства

С целью проведения экспериментальной проверки выбранных решений конструкции РИС в части измерения концентрации плазмы в диапазоне $10^3 - 10^6 \text{ см}^{-3}$ проведено лабораторное макетирование. Важным моментом является выбор геометрических параметров четвертьволнового резонатора на отрезке двухпроводной линии (диаметр и длина проводников, расстояние между ними) которые определяют его резонансную частоту в вакууме, а так же чувствительность диагностической системы, и ее вес. Оценки показали, что для измерения концентрации плазмы в диапазоне $10^3 - 10^6 \text{ см}^{-3}$ на высоте полета спутника порядка 500 км оптимальным значением собственной частоты РИС будет 180МГц, что соответствует длине резонатора 40см. При добротности $Q=350$

максимальный сдвиг собственной частоты, соответствующий концентрации 10^6 см^{-3} , не будет превышать ширину резонансной кривой. Для измерения малых сдвигов частоты использовался развитый амплитудно-фазовый метод. Лабораторный образец РИС (рис. П.6) изготовлен из двух медных прутков диаметром 6мм, расположенных на расстоянии 4см. При такой конструкции РИС вес антенны не будет превышать 0,3кг.

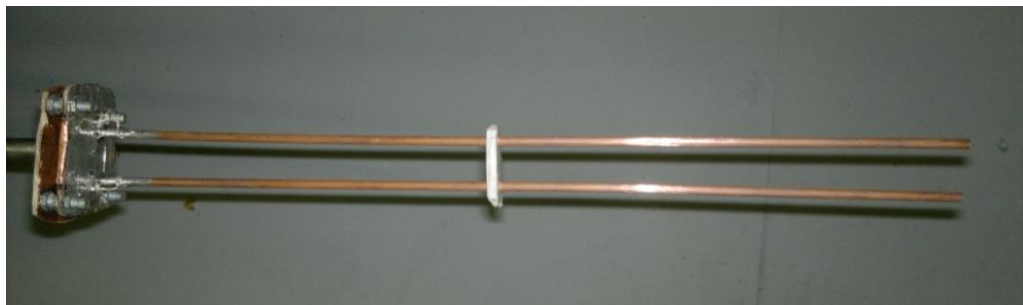


Рис. П.6 Фотография макета РИС. Длина медных проводов 40см, расстояние между ними 4см, диаметр 6мм. В центральной части резонатора установлена диэлектрическая пластина, препятствующая акустическим колебаниям металлических стержней.

Слева на рис. П.6 припаянная пластина из фольгированного текстолита имитирует часть корпуса микроспутника и одновременно является закороченным концом резонатора. В центральной части макета установлена фторопластовая перемычка толщиной 4мм, жестко фиксирующая провода резонатора. Диэлектрическая перемычка препятствует возможным механическим колебаниям (крутильным, камертоновым и др.) металлических стержней.

В качестве источника высокочастотных сигналов использовался свип-генератор в виде быстродействующего синтезатора частот на основе однопетлевой системы ФАПЧ с возможностью генерации на фиксированной частоте. Стабильность частоты составляла 10^{-8} . Для исключения паразитного влияния помех в возбуждающей и приемной линиях резонатора использовались полосовые фильтры с полосой пропускания 170-190МГц. Фильтры были выполнены на основе двухконтурной L-C схемы с коэффициентом ослабления 2дБ во всей полосе пропускания. Фазовый детектор выполнен на микросхеме ADE-R2ASKLN+ с коэффициентом ослабления 8 дБ в рабочем диапазоне частот. Усилитель изготовлен на основе микросхемы OP27 с коэффициентом усиления 30дБ. Для оцифровки сигнала использовался 14-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) USB3000 с частотой дискретизации 3МГц и разрешающей способностью 1.2мВ. Сигнал с АЦП записывался в память ПК и в дальнейшем обрабатывался с помощью программы Matlab R2015a. Схема измерений, в состав которой входил макет РИС изображена на рис. .

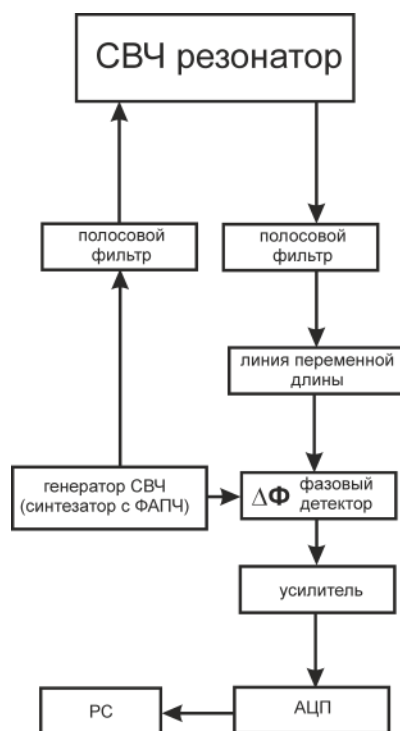


Рис. П.7 Блок-схема измерений концентрации плазмы четвертьволновым СВЧ-зондом

На рис. П.18 а, б представлены соответственно амплитудно-частотная (резонансная кривая) и фазо-частотная характеристики РИС. Собственная резонансная частота $f_0 = 180.956$ МГц, амплитуда сигнала в максимуме резонансной кривой $U_{\max} = 310$ мВ при амплитуде сигнала генератора 1 В, добротность $Q=350$.

На рис. П.18 в представлена частотная зависимость сигнала с фазового детектора в измерительной схеме. Вертикальными пунктирными линиями обозначен рабочий диапазон измерительной системы. Сигнал с фазового детектора на резонансной частоте равен нулю (случай, когда нет плазмы). В диапазоне $[f_0 - 100\text{кГц}, f_0 + 100\text{кГц}]$ зависимость сигнала с фазового детектора от частоты имеет линейный характер.

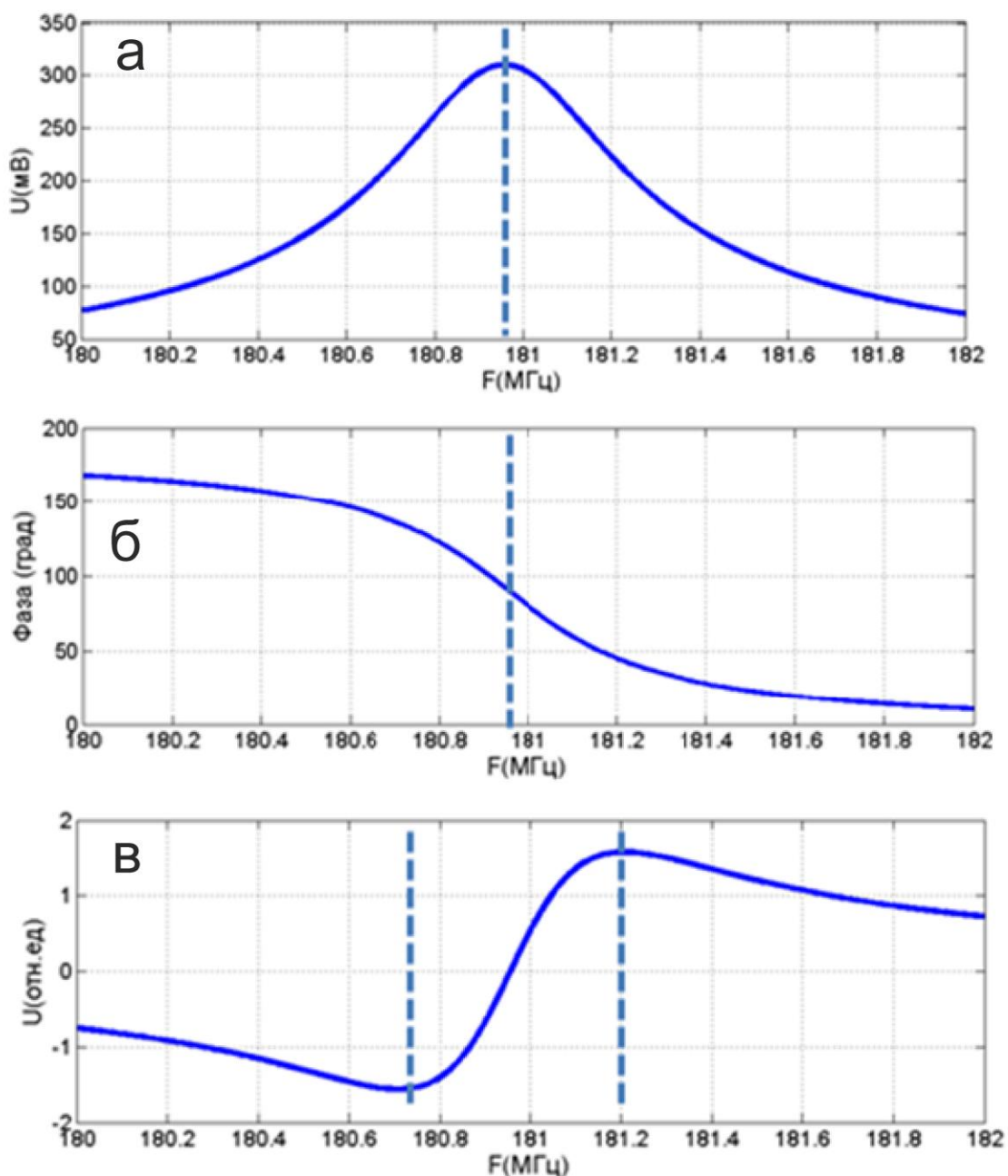


Рис. П.8 Характеристики резонансной измерительной системы:

а) резонансная кривая $U(f)$ лабораторного образца резонатора РИС; $f_0 = 180.956 \text{ МГц}$, $U_{\text{max}} = 310 \text{ мВ}$, $Q = 350$;

б) фазо-частотная характеристика $\varphi(f)$ лабораторного образца резонатора РИС на резонансной частоте $\varphi(f = f_0) = \pi / 2$;

в) частотная зависимость сигнала с фазового детектора. Вертикальными пунктирными линиями обозначен рабочий диапазон измерительной системы. В диапазоне $[f_0 - 100 \text{ кГц}, f_0 + 100 \text{ кГц}]$ зависимость сигнала с фазового детектора от частоты имеет линейный характер.

На рис. П.9 представлен теоретический расчет амплитуды сигнала на выходе измерительной системы от концентрации плазмы: в диапазоне концентрации плазмы от 10^3 до 10^6 см^{-3} выходной сигнал изменяется в пределах от 10мВ до 5В.

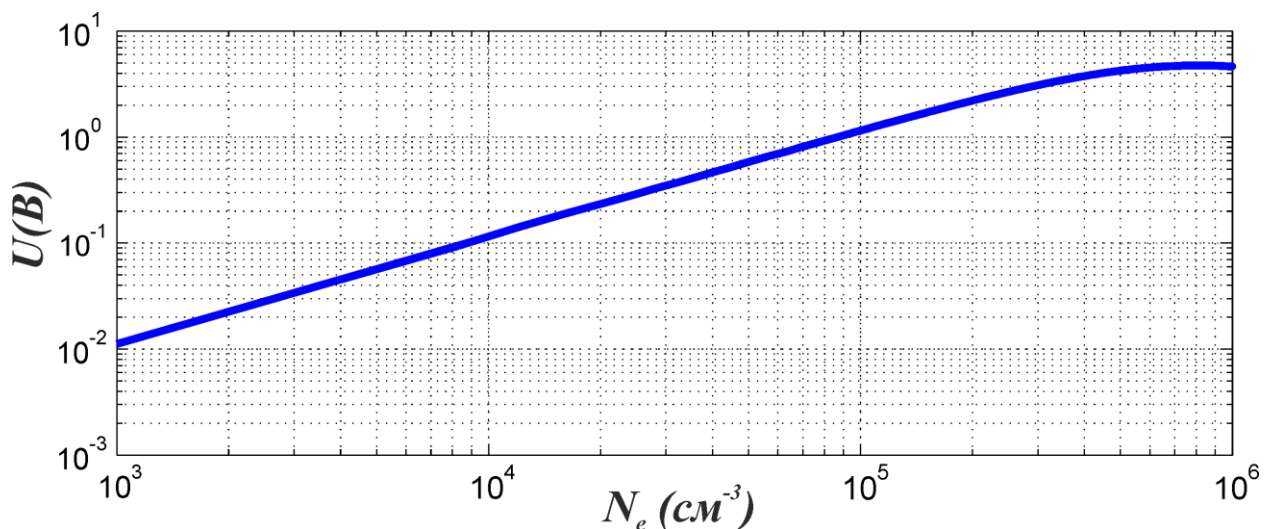


Рис. П.9 Зависимость амплитуды сигнала на выходе измерительной системы от концентрации плазмы (теоретический расчет)

На рис. П.10 представлен теоретический расчет относительных возмущений электронной концентрации $\delta n / N_e$, регистрируемые измерительной системой при разных значениях концентрации N_e фоновой плазмы. Чувствительность системы к возмущениям концентрации определяется уровнем шумовой составляющей выходного сигнала. В расчетах величина шумовой составляющей задавалась 10^{-3} В, при этом минимальное значение возмущений концентрации способное зарегистрировать измерительная система находится на уровне 10^2 см^{-3} .

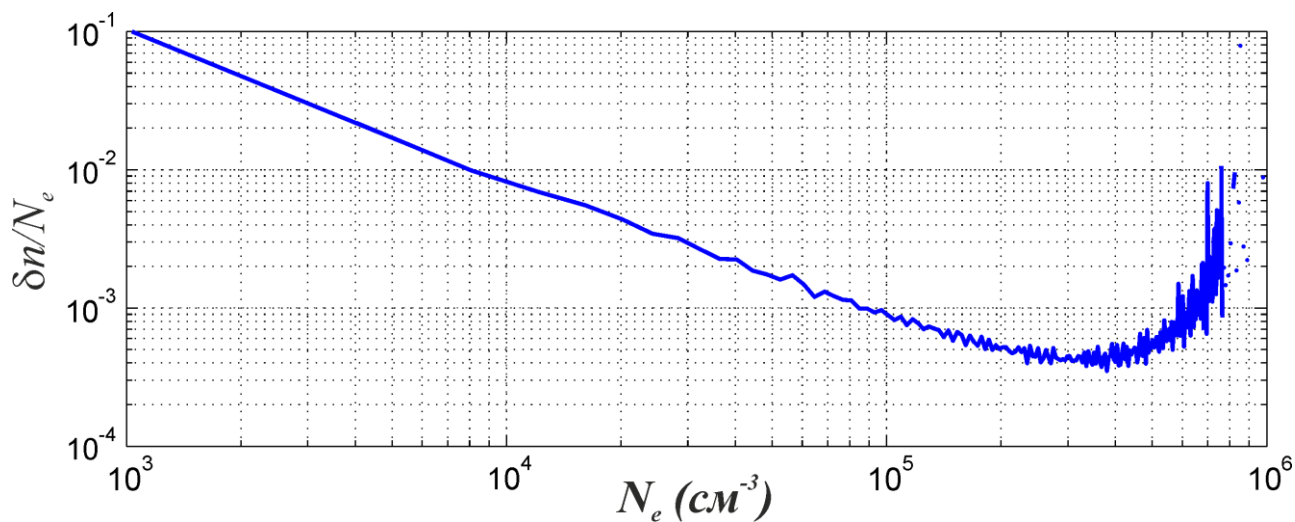


Рис. П.10 Относительные возмущения электронной концентрации $\delta n / N_e$, регистрируемые измерительной системой при разных значениях концентрации N_e фоновой плазмы (теоретический расчет).

Тестирование РИС проводилось на уникальном плазменном стенде «Ионосфера» (Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород), позволяющей моделировать многие процессы в ионосфере в масштабе 1:1 (рис. П.11). Параметры установки приведены в первой главе диссертации. РИС помещалась внутрь камеры через торцевой оргстеклянный фланец на подвижной штанге вдоль магнитного поля. На рис. П.12 представлены результаты измерений концентрации плазмы с помощью экспериментального образца резонатора РИС. Независимая оценка концентрации плазмы в процессе распада проводилась на основе измерений концентрации в диапазоне $10^6 - 10^8 \text{ см}^{-3}$, выполненных с помощью резонансного СВЧ-зонда с собственной резонансной частотой 520 МГц.

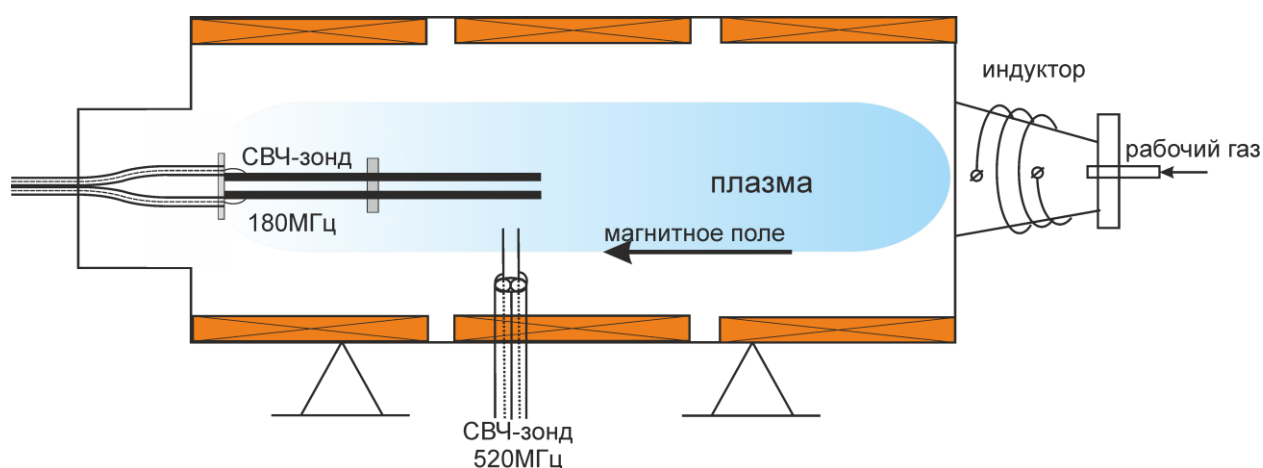


Рис. П.11 Схема экспериментальной плазменной установки ИОНОСФЕРА для моделирования в масштабе 1:1 макета резонансной измерительной системы датчика параметров плазмы для установки на борту микроспутника «Грабант». Датчик установлен на оргстеклянном фланце с торца вакуумной камеры вдоль магнитного поля.

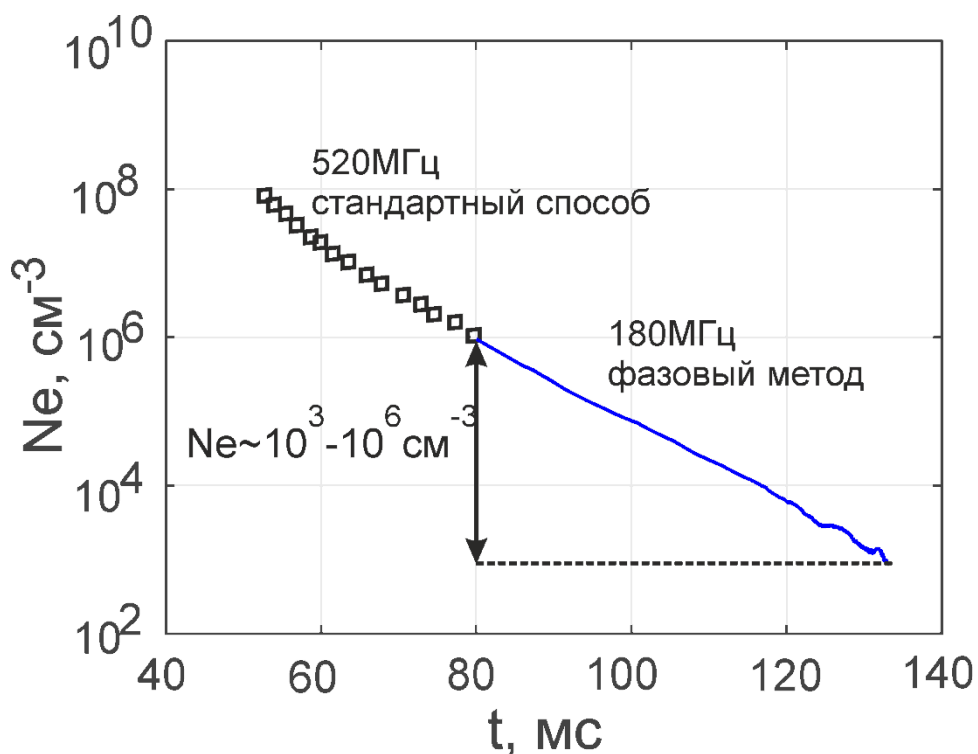


Рис П.12 Временной ход концентрации плазмы после выключения плазмосоздающего генератора с помощью макета резонансной измерительной системы датчика параметров плазмы для микроспутника «Трабонт» и с помощью резонансного СВЧ-зонда с собственной резонансной частотой 520МГц.

Значения концентрации плазмы на временах 0.02-0.08с после выключения плазмосоздающего источника, получены с помощью СВЧ-зонда, на временах 0.08-0.135с – с помощью экспериментального образца резонатора РИС. Суммарная зависимость $\ln N(t)$ полученная двумя диагностиками имеет линейный характер и совпадает с законом диффузионного распада плазмы на экспериментальной установке «ИОНОСФЕРА». Данный эксперимент подтверждает правильность измерений концентрации плазмы в диапазоне $10^3 - 10^6 \text{ см}^{-3}$, выполненных экспериментальным образцом резонансной измерительной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы.

1. Построена электродинамическая модель измерительной системы на основе импедансного подхода, позволяющая установить аналитическую связь между сдвигом резонанса и его амплитудой с диэлектрической проницаемостью и проводимостью среды.
2. Развита 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 2ГГц для измерения концентрации лабораторной плазмы и датчик давления газа на полуволновом отрезке коаксиальной линии. При измерении пространственно-временных распределений концентрации плазмы на уникальной плазменной установке «ИОНОСФЕРА» продемонстрировано, что применение развитого метода позволило уменьшить минимальное измеряемое значение электронной плотности плазмы на три порядка, не увеличивая геометрических размеров зонда. Полный динамический диапазон измеряемых значений составил пять порядков. Пространственный диапазон измерений при этом расширился более чем в два раза. На примере датчика давления газа продемонстрирована высокая чувствительность диагностической системы к изменению диэлектрической проницаемости газа в восьмом знаке после запятой. Высокое временное разрешение датчика на уровне 1мкс позволило осуществить диагностику нестационарных газовых процессов при импульсном напуске газа в вакуумную камеру.
3. Показана диагностическая ценность ближнепольного резонансного СВЧ-зондирования для неинвазивной диагностики в медицинских приложениях. Разработаны резонансные СВЧ-датчики для оценки электродинамических параметров кожи для выявления новообразований и изучения характеристик ожоговых ран. Применительно к диагностике пигментных новообразований кожи показаны существенные отличия интегральной диэлектрической проницаемости тканей кожи в области здорового участка кожи, пигментного невуса и меланомы, что может быть использовано для экспресс-анализа новообразований на ранних стадиях развития.
4. 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. Изготовлена система ближнепольных антенн на отрезках двухпроводной линии, реализующая глубинное зондирование среды. По предложенному алгоритму с хорошей степенью точности восстановлены геометрические размеры и электродинамические параметры неоднородности.

5. Разработана конструкция датчика параметров ионосферной плазмы для установки на борту микроспутника «ГРАБАНТ». Изготовлен макет измерительной антенны. С целью проведения экспериментальной проверки выбранных решений конструкции антенны в части измерения концентрации плазмы в диапазоне $10^3 - 10^6 \text{ см}^{-3}$ проведено лабораторное макетирование датчика на уникальной крупномасштабной плазменной установке «ИОНОСФЕРА» в масштабе 1:1. Вспомогательные блоки диагностической аппаратуры проработаны в виде готовых схемотехнических решений.

В заключение автор считает своим долгом выразить благодарность всем тем, кто оказывал ему помощь в осмыслении и интерпретации представленных в диссертации результатов. В первую очередь, автор глубоко благодарит своего учителя и научного руководителя диссертационной работы А.В. Кострова, обучившего его радиофизике и основам проведения экспериментальных исследований. Автор выражает глубокую признательность Д.В. Янину и А.К. Мартусевичу за помощь в получении и оформлении результатов.

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. М.И. Эпов, В.Л. Миронов, П.П. Бобров, И.В. Савин, А.В. Репин. Исследование диэлектрической проницаемости нефтесодержащих пород в диапазоне частот 0.05—16 ГГц // *Геология и геофизика*, 2009, т. 50, № 5, с. 613—618.
3. T. Sunaga, H. Ikehira, S. Furukawa, H. Shinkai, H. Kobayashi, Y. Matsumoto, E. Yoshitome, T. Obata, S. Tanada, H. Murata and Y. Sasaki. 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. M. Lazebnik, D. Popovic, L. McCartney, C.B. Watkins, M. J. Lindstrom, J. Harter, S. Sewall, T. Ogilvie, A. Magliocco, T. M. Breslin, W. Temple, D. Mew, J. H. Booske, M. Okoniewski and S. C. Hagness. 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. А.В. Корженевский, А.Ю. Карпов, В.Н. Корниенко, Ю.С. Культиасов, В.А. Черепенин. Электроимпедансная томографическая система для трехмерной визуализации тканей молочной железы // *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. – 2003. – № 8. – С. 5-10.
8. А.В. Корженевский, В.А. Черепенин, "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.
13. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи с распределенными параметрами, М.: Радио и связь, 1980. 152 с.
14. Кугушев А.М., Голубева Н.С., Энергия, Москва. 400 с. 1977
15. Kondrat'ev I.G., Kostrov A.V., Smirnov A.I., Strikovskii A.V., Shashurin A.V. Two-wire microwave resonator probe // Plasma Physics Reports. V.28, №11, 2002
16. Р. Хаддлстоун, С. Леонард. Диагностика плазмы. М.: – Мир. 1967, – 515 с.
17. О.В. Козлов. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969. 292 с.
18. Подгорный И.М. Лекции по диагностике плазмы. М.:Атомиздат, 1968, 219 с
19. Yanin, D. V., Kostrov, A. V., Smirnov, A. I., and Strikovskiy, A. V., Technical Physics, 53, 1, 129 (2008)
20. Yanin, D.V., Kostrov, A. V., Smirnov, A. I., Gushchin, M. E., Korobkov, S. V., Strikovskiy, A. V., Gundorin, V. I., Nazarov, V. V., and Starodubtsev. M. V., Technical Physics, 57, 4, 468 (2012)
21. Aidakina, N.A., Gushchin, M.E., Zudin, I.Y., Korobkov, S.V., and Strikovskiy, A.V., Phys. Plasmas 25, 072114 (2018)
22. Curley, G.A., Gatilova, L., Guilet, S., Bouchoule, S., Booth J.P., Gogna,G.S., Sirse,N., Karkari S.K., and Booth, J.P., J. Vac. Sci. Tech. A, 28, 360 (2010)
23. Karkari S.K., and Ellingboe A.R., Appl. Phys. Lett. Vol. 88 101501, (2006)
24. Hebner, G.A., and Abraham I.C., J. Appl. Phys., 90:4929, 2001
25. Kostrov, A.V., Smirnov, A.I., Strikovskiy, A.V., and Yanin D.V., Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics. 1, 13, 209 (2007)
26. Gogna, G. S., Karkari, S. K., and Turner, M. M., Phys. Plasmas 21, 123510 (2014)
27. Gogna, G.S., and Karkari, S.K, Appl. Phys. Lett. 96, 151503 (2010)
28. Piejak, R. B., Godyak, V. A., Garner, R., and Alexandrovich, B. M., J. Appl. Phys. 95(7), 3785 (2004)
29. Haas, F.A, AL-Kuzee, J., and Braithwaite, N.St., J. Appl. Phys. Lett. 87, 201503 (2005)
30. Yanin, D.V., Kostrov, A. V., Smirnov, A. I., Gushchin, M. E., Korobkov, S. V., Strikovskiy, A. V., Gundorin, V. I., Nazarov, V. V., and Starodubtsev. M. V., Technical Physics, 57, 4, 468 (2012)
31. Rothamel, K., Antenne. Franck-Kosmos Velags-GmbH&Co., Stuttgart, (1995)
32. Ч.Ф. Смайс. Диэлектрическая постоянная и структура молекул. ОНТИ, 1937
33. Вайсбергер А. Физические методы органической химии. Т. 3, ИЛ, 1954

34. C. Michels. Dielectric constant of N₂ by pressure 150bar. *Philos. Mag.*, 1932, 13, №88, 1192-1196.
35. А.А. Брандт. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963. 404 с.
36. Г.Корн, Т.Корн. Справочник по математике для научных сотрудников и инженеров. М.:Наука, 1968. – 720с.
37. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика Электродинамика сплошных сред. т. 8. М., Наука, 1982. 621 с.
38. Богородский Н.П., Пасынков В.В., Материалы в радиоэлектронике. М.-Л., Госэнергоиздат, 1961, 352 с.
39. Ганцев Ш.Х., Ников Н.П., Мустафин М.А. Неотложные состояния в онкологии. Вопросы диагностики и лечения: Пособие для врачей. Уфа, 1992. 70 с.
40. Ламоткин И.А. Опухоли и опухолеподобные поражения кожи. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 166 с.
41. Mar V., Roberts H., Wolf R., English D.R., Kelly J.W. Nodular melanoma: A distinct clinical entity and the largest contributor to melanoma deaths in Victoria, Australia. *J Am Acad Dermatol.* 2013; 68(4): 568—575.
42. Безуглый А.П. Современные неинвазивные методы диагностики кожи, критерии выбора // Материалы III Всероссийского конгресса дерматовенерологов. Казань, 2009. С. 32.
43. Gelfond M.L. Differential diagnosis of skin tumors in dermatological and cosmetological practice. *Practical Oncology.* 2012; 13(2): 69—79.
44. Sokolov D.V., Demidov L.V., Belishiva T.S., Potekaev N.N., Virogtsov G.N., Kuzmin S.G. and other. History of the development of the method of surface epiluminescence microscopy (dermatoscopy) skin. *Clinical dermatology and venereology.* 2009; 1: 11—14.
45. Rubegni P., Sbrano P., Burroni M. et al. Melanocytic skin lesions and pregnancy: digital dermoscopy analysis // *Skin Res. Technol.* 2007. Vol. 13 (2). P. 143–147.
46. С.А. Васильченко, Н.В. Тонэ, Л.В. Костенко, С.Г. Бурков. Ультразвуковая диагностика опухолей кожи в планировании объема хирургического вмешательства. // *SonoAce-Ultrasound*, N24, 2012. с. 75-81.
47. Демидов Л.В., Соколов Д.В., Булычева И.В., Шашков Б.В., Махсон А.Н., Ворожцов Г.Н., Кузьмин С.Г., Соколов В.В. Совершенствование методов диагностики меланомы кожи. // *Вестник РОНЦ им. Н.Н. Блохина РАМН.* – 2007. – Т.18, №1. – стр.36-41.

48. Irving J. Bigio and Judith R. Mourant. Ultraviolet and visible spectroscopies for tissue diagnostics: fluorescence spectroscopy and elastic-scattering spectroscopy// *Phys. in Medicine and Biology* 42, 803- 814
49. Jichlinski P, Lovisa B, Erling C, Aymon D, van den Bergh, Wagnieres G. Fluorescence cystoscopy: Perspective in clinical practice and research // *Der Urologe. Ausg. A*, vol. 47, num. 8, p. 975-7, 2008.
50. Скрипаль А.В., Сагайдачный А.А., Усанов Д.А. Тепловизионная биомедицинская диагностика: Учеб. пособие для студ. фак. нано–и биомед. технологий, обучающихся по спец. «Медицинская физика» и направлению «Биомедицинская инженерия». – Саратов. 2009. –118.
51. Колесов С.Н., Воловик М.Г. Современная методология тепловизионных исследований и тепловизионная диагностическая аппаратура // *Оптический журнал* 2013; 86(6): 59-68.
52. Мартусевич А.К., Ларионова К.Д., Перетягин С.П., Перетягин П.В., Давыдюк А.В. Экспериментальная оценка влияния лекарственных композиций на состояние микроциркуляции в раннем послеожоговом периоде // *Фундаментальные исследования*. – 2013. - №3., Ч. 2. – С. 332-336.
53. Турчин И.В. Методы оптической биомедицинской визуализации: от субклеточных структур до тканей и органов // *Успехи физических наук* 2016; 186(5): 550–567.
54. Лаврешин П.М., Владимирова О.В. Гобеджишвили В.К. Термические и химические повреждения. Электротравма: учебное пособие для студентов, врачей интернов, клинических ординаторов, работни -ков практического здравоохранения. – Ставрополь: Изд-во СтГМУ, 2017. – 144 с.
55. Алексеев А.А., Крутиков М.Г., Шлык И.В., Левин Г.Я., Ушакова Т.А., Тюрников Ю.И., Богданов С.Б., Бобровников А.Э. Диагностика и лечение ожогового шока: клинические рекомендации: Общероссийская общественная организация «Объединение комбустиологов «Мир без ожогов». М.– 2014.
56. Гуллер А.Е., Шехтер А.Б. Клинический тип и гистологическая структура кожных рубцов как прогностические факторы исхода лечения// *Анн. пластической, реконструктивной и эстетической хирургии*. – 2007. - № 4. – С.19-22.
57. Шехтер Б.А., Гуллер А.Е. Морфологическая характеристика рубцовых тканей и новая клинико-морфологическая классификация рубцов кожи человека// *Архив патологии*. - 2008. – Т.70, № 1. – С.6-13.
58. Chen M.A., Davidson T.M. Scar management: prevention and treatment strategies// *Curr. Opin. Otolaryngol. Head Neck Surg*. – 2005. – Vol.13 (4). – P.242-247.

59. Гуллер А.Е., Шехтер А.Б. Клинический тип и гистологическая структура кожных рубцов как прогностические факторы исхода лечения // *Анналы пластической, реконструктивной и эстетической хирургии*. 2007, №4. С. 19-31.
60. Петров С.В., Райхлин Н.Т. Общие принципы иммуногистохимической диагностики и классификации опухолей. Руководство по иммуногистохимической диагностике опухолей человека. - Казань, 2000, с.39-57.
61. Gogly, B., Godeau, G. and Gilbert, S. Morphometric analysis of collagen and elastic fibers in normal skin and gingival in relation to age // *Clinical Oral Investigation*, 1997, vol. 1, n. 3, p. 147-52.
62. Fibroblasts from post-burn hypertrophic scar tissue synthesize less decorin than normal dermal fibroblasts // *Clin. Sci (Lond)*, 94 (5), p. 541-547.
63. Vogt M., Kaspar K., Altmeyer P. et. al. High frequency ultrasound for high resolution skin imaging. *Frequenz* 2005; 59: 5—6: 150—153.
64. Jasaitiene D., Valiukeviciene S., Linkeviciute G. et al. Principles of high-frequency ultrasonography for investigation of skin pathology. *J Eur Acad Dermatol Venerol*, 2011; 25: 4: 375—382.
65. А.П. Безуглый, Н.Н. Бикбулатова, Е.А. Шугина, П.А. Белков, Н.Р. Хабутдинова. Ультразвуковое исследование кожи в практике врача-косметолога // *Вестник дерматологии и венерологии*. No 3, 2011. С. 142-152
66. Шаробаро В.И., Тимина И.Е., Трыкова И.А. Изучение структурно-функциональных особенностей рубцовой ткани по данным ультразвукового исследования перед восстановительными оперативными вмешательствами. // *Сборник материалов национального конгресса «Пластическая хирургия» - Москва, 2011. – С.12.*
67. Трыкова И.А., Тимина И.Е., Шаробаро В.И., Чекмарева И.А. Возможности ультразвуковой диагностики в лечении пациентов с рубцовыми деформациями кожных покровов // *Медицинская визуализация.. – 2013. - №1. - с. 115-121.*
68. Trykova I., Sharobaro V., Timina I., Moroz V., Vaganova N., Yudenich A., Grechishnikov M. Noninvasive differential diagnostics of hypertrophic and keloid scars by high-frequency ultrasound // *17th World Congress of the International Confederation for Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgery. – Santiago, Chile. – 2013. P. 138-142.*
69. Парамонов Б.А., Турковский И.И. Проблемные вопросы диагностики и лечения патологических рубцов кожи. Труды Научно-практической конференции «Доказательная косметология: методы, критерии, перспективы». Москва, 24 октября 2008г. с. 44-47.
70. A.V. Kostrov, A.I. Smirnov, D.V. Yanin, A.V. Strikovskiy and G.A. Panteleeva. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. Vol. 69. No.12. P. 1911 (2005).

71. A.V. Kostrov, A.I. Smirnov, G.A. Panteleeva, A.V. Strikovskiy and D.V. Yanin, in Proceedings of 15th International Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (Sevastopol, 2005), pp. 751-752.
72. A.V. Kostrov, V.A. Kostrov, A.I. Smirnov, A.V. Strikovskiy and D.V. Yanin, in Proceedings of 16th International Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (Sevastopol, 2006), pp. 769-770.
73. A.V. Kostrov, A.I. Smirnov, A.V. Strikovskiy, D.V. Yanin, G.A. Panteleeva and Z.V. Davoyan, in Proceedings of 17th International Conference "Microwave & Telecommunication Technology", (Sevastopol, 2007), pp. 726-727.
74. A.V. Kostrov, A.I. Smirnov, A.V. Strikovskiy, D.V. Yanin, G.A. Panteleeva and Z.V. Davoyan, in Proceedings of 7th International Conference on Antenna Theory and Techniques (Lviv, 2009), pp. 357-359.
75. A.V. Kostrov, A.I. Smirnov, A.V. Strikovskiy and D.V. Yanin. Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics. No.1. 13. (2007).
76. A.V. Kostrov, A.V. Strikovskiy, D.V. Yanin, A.I. Smirnov, V.E. Zagainov, S.A. Vasenin, I.N. Druzhkova, G.A. Panteleeva and Z.V. Davoyan. Almanah klinicheskoy meditsini. Vol. 17. part 2. (2008).
77. V.E. Zagainov, S.V. Mironov, S.A. Vasenin, A.V. Kostrov, A.V. Strikovskiy and D.V. Yanin. Meditsinskiy nauchno-prakticheskiy zhurnal "Sovremennii tehnologii v meditsine" No.1-2 (2010).
78. S.A. Vasenin, I.N. Druzhkova, A.V. Kostrov, A.V. Strikovskiy, D.V. Yanin and V.E. Zagainov. Meditsinskiy almanah. No.5 (2008).
79. Daigeler A, Kapalschinski N, Lehnhardt M. Therapy of burns // Chirurg. 2015. Vol. 86. N4. P. 389-401
80. T. Burns // Nihon Rinsho. 2016. Vol. 74, N2. P. 231-235.
81. Колесов С.Н., Воловик М.Г. Современная методология тепловизионных исследований и тепловизионная медицинская аппаратура // Оптический журнал. 2013. Т. 80, №6. С. 59-67
82. Воловик М.Г., Колесов С.Н. Обоснование выбора функциональных проб в медицинском тепловидении (на примере спиртовой пробы) // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 7. С. 62-74.
83. Hammody Z., Argov S., Sahu R.K. et al. Distinction of malignant melanoma and epidermis using IR micro-spectroscopy and statistical methods // Analyst. 2008. Vol. 133, N 3. P. 372-378.

84. Tan Q., Xu P. Repair of skin and soft tissue defects around the knee joint // *Zhonghua Shao Shang Za Zhi*. 2015. Vol. 31. N5. P. 321-324.
85. Замятин А.Л. Повышение информативности исследования геологической среды на основе георадарного зондирования // *Горн. информ.-аналит. бюл.* - 2006. - N 6. - С.130-132.
86. Изюмов С.В., Дручинин С.В. Особенности эксплуатации георадаров при проходке подземных горных выработок // *Научные технологии*. - 2006. - Т.7, N 3. - С.28-38.
87. Изюмов С.В., Дручинин С.В. Применение георадаров серии "ТР-ГЕО" в инженерной геофизике и строительстве // *Разведка и охрана недр*. - 2005. - N 12. - С.22-24.
88. Изюмов С.В., Дручинин С.В., Чернокалов А.Г. Опыт применения георадаров ТР-ГЕО для исследования оснований фундаментов и сооружений Троице-Сергиевой Лавры // *РОБТ*. - 2001. - N 3. - С.16-19.
89. Иммореев И.Я. Сверхширокополосные радары. Особенности и возможности // *Радиотехника и электроника*. - 2009. - Т.54, N 1. - С.5-31.
90. Вопросы подповерхностной радиолокации: коллективная монография под ред. Гринева А.Ю. // М.: Радиотехника, 2005. 416 с.
91. Хармут, Х.Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и связи. – М. : Радио и связь, 1985.
92. Брусенцов Ю.А., Филатов И.С., Проценко И.Г, Серёгин М. Ю., Однолько В. Г. Улучшение избирательности антенн георадаров. Вопросы современной науки и практики Университет им. В.И.Вернадского, №6 (20), 2009г., с.111-114
93. В.В. Кузьмин, В.Г. Сугак. К возможности радиофизического мониторинга верхней подповерхностной структуры Земли // *Изв. вузов. Радиофизика*, 1997, №3. – С. 274– 280.
94. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография под ред. А.Ю.Гринева. – М. Радиотехника, 2005. – 416с.
95. С.В. Изюмов, С.В. Дручинин, А.С. Вознесенский. Теория и методы геолокации - М.: Издательство "Горная книга", Издательство Московского государственного горного университета, 2008. - 196 с
96. Неделин Д.Ю., Леонов Н.Н. Комплекс объемной разведки горизонтов "СИРЕНА"// Всероссийская научно-техническая интернет-конференция "Новые технологии в природопользовании" 23.12.2012.
97. Жамалетдинов А. Введение в теорию и методику электроразведки переменным током. Учебно-методическое пособие. - Апатиты: КФ Петр. ГУ, 2008. -34 с.
98. Хмелевской В.К., Яковлев А.Г., Модин И.Н., Пушкарев П.Ю., Казурова Н.Р. Комплексные электромагнитные исследования в Калужской области при проведении

учебно-производственных геофизических практик. Вестник МГУ, Серия 4 (Геология), 1999, No5, с. 64 - 68.

99. Могилатов В.С., Мухамадиев Р.С., Балашов Б.П., Смоленцев В.В., Феофилов С.А., Темирбулатов Ш.С., Потапов В.В. Результаты работ по оконтуриванию залежей нефти в Татарстане методом зондирования вертикальными токами // Геофизика, 2003, No5, С. 47-54.

100. Журбин И.В., Груздев Д.В. Многоэлектродная аппаратура и программное обеспечение для малоглубинной электроразведки в археологии // Разведка и охрана недр. - 2004. - N 12. - С.37-38.

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

102. Каган Ю.М., Перель В.И. Зондовые методы исследования плазмы // Успехи физических наук, 1963, 81, 409–452

103. J. P. Lebreton, S. Stverak, P. Travnicek, M. Maksimovic, D. Klinge, S. Merikallio, D. Lagoutte, B. Poirier, P.-L. Blelly, Z. Kozacek, M. Salasquarda. The ISL Langmuir probe experiment processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results // Planetary and Space Science, Volume 54, Issue 5, April 2006, Pages 472-486

104. Губский В.Ф. Влияние магнитного поля на измерения концентрации и температуры электронов цилиндрическими зондами в ионосферной плазме Земли // Солнечно-земная физика. Вып. 12. Т. 2. (2008) 261-263

105. Dote T., Amemiya H., Ichimiya T. Effect of the geomagnetic field on an ionospheric sounding probe // J. Geophys. Res. 1965. V. 70, N 9. P. 2258–2261.

106. Laframboise J.G., Rubinstein J. Theory of a cylindrical probe in a collisionless magnetoplasma // Phys. Fluids. 1976. V. 19, N 12. P. 1900–1908.

107. Szuszczewicz E.P., Takas P. Magnetosheath effects on a cylindrical Langmuir probes // Phys. Fluids. 1979. V. 22, N 12. P. 2424–2429.

108. Dote T., Amemiya H. Analysis of the negative characteristic of a cylindrical probe in a magnetic field // J. Phys. Soc. Japan. 1967. V. 22, N 1. P. 270–276.

109. E. Seran, J.-J. Berthelier, F. Z. Saouri, J.-P. Lebreton. The spherical segmented Langmuir probe in a flowing thermal plasma: numerical model of the current collection. Annales Geophysicae, European Geosciences Union, 2005, 23 (5), pp.1723-1733

110. P. M. E. Decreau, J. Etcheto, K. Knott, A. Pedersen, G. L. Wrenn, D. T. Young Multi-Experiment Determination of Plasma Density and Temperature // Space Sci. Rev., 22, 633, 1978b

111. Chappell, C.R., Harris, K.K., and Sharp, G.W. A study of the influence of magnetic activity on the location of the plasmopause as measured by OGO 5 // 1970, *J. Geophys. Res.* 75, p.50-55.
112. DeForest, S E. and McIlwain, C.E.: *Journal of Geophysical Research*, 1971, Volume 76, Issue 16, p. 3587
113. Etcheto, J. and Bloch, J.J. Plasma density measurements from the GEOS-1 relaxation sounder // *Space Science Reviews*, Nov. 1978, vol. 22, p. 597-610.
114. Geiss, J., Balsiger, H., Eberhardt, P., Walker, H.P., Weber, G., Young, D.T., and Rosenbauer, H.: 1978, *Space Sci. Rev.* 22, 537-566
115. Johnson, J.F.E., Sojka, J.J., and Wrenn, G.G. Thermal/suprathermal plasmas observed by the S-302 experiment on GEOS-1 1978. *Space Science Reviews*, vol. 22, Nov. 1978, p. 567-580.
116. B.Bertotty, *Phys. Fluids* 4, 1047 (1961);
117. И.К. Фетисов, *ЖЭТФ* 36, 1110 (1959)
118. P. M. E. Decreau, C. Béghin, M. Parrot. Electron density and temperature, as measured by the mutual impedance experiment on board Geos-1// *Space Sci. Rev.*, 22, 581, 1978a
119. P. M. E. Décréau, C. Béghin, M. Parrot. Global characteristics of the cold plasma in the equatorial plasmopause region as deduced from the Geos 1 Mutual Impedance Probe // *Journal of Geophysical Research*, vol. 87, Feb. 1, 1982, p. 695-712
120. J. Geiswiller, J.G. Trotignon, C. Béghin, E. Kolesnikova. Rosetta mission mutual impedance probe modelling: the short and long Debye length plasma cases // *Astrophysics and Space Science*, June 2001, Volume 277, Issue 1, pp 317–318
121. Béghin, C.: 1995, *Radio Sci.* 30, 307.
122. Béghin, C. and Kolesnikova, E.: 1998, *Radio Sci.* 33, 503.
123. Storey, L.R.O., Aubry, M.P. and Meyer, P.: 1969, in: J.O. Thomas and B.J. Landmark (eds.), *Plasmas Waves in space and in Laboratory*, University Press Edinburgh 1, 303.
124. Trotignon, J.G. et al.: 1999, MIP – RPC: the Mutual Impedance Probe in the Rosetta Plasma Consortium. ESA SP-1165.
125. Decreau, P.M.E., Ferreau, P., Krannosels'kikh, V. et al. WHISPER, A Resonance Sounder and Wave Analyser: Performances and Perspectives for the Cluster Mission // *Space Science Reviews* (1997) 79: 157.
126. Seran, E. Reconstruction of the ion plasma parameters from the current measurements: mathematical tool // *Annales Geophysicae*, 05/2003, vol. 21, Issue 5, pp.1159-1166
127. Berthelier, J. J.; Godefroy, M.; Leblanc, F.; Seran, E.; Peschard, D.; Gilbert, P.; Artru, J. IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER, 2006, *Planetary and Space Science*, Volume 54, Issue 5, p. 487-501.

128. LI Liu-Yuan, YANG Jun-Ying, CAO Jin-Bin, LU Li, WU Yun, YANG Dong-Mei, Statistical backgrounds of topside-ionospheric electron density and temperature and their variations during geomagnetic activity, *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, V54(10): 2437-2444, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.10.001
129. Kakinami, Y., C. H. Lin, J. Y. Liu, M. Kamogawa, S. Watanabe, and M. Parrot (2011), Daytime longitudinal structures of electron density and temperature in the topside ionosphere observed by the Hinotori and DEMETER satellites, *J. Geophys. Res.*, 116, A05316, doi:10.1029/2010JA015632.
130. Malingre, M., J.-J. Berthelier, R. Pfaff, J. Jasperse, and M. Parrot (2008), Lightning-induced lower-hybrid turbulence and trapped Extremely Low Frequency (ELF) electromagnetic waves observed in deep equatorial plasma density depletions during intense magnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 113, A11320, doi:10.1029/2008JA013463.
131. Y. Wong, J. Chen, L. C. Lee, and L. Y. Liu, Observation of Large-Scale Density Cavities and Parametric-Decay Instabilities in the High-Altitude Discrete Auroral Ionosphere under Pulsed Electromagnetic Radiation, *Phys. Rev. Lett.*, 102 (10), DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.105002, 2009.
132. Shivalika Sarkar, Sunita Tiwari and A.K. Gwal, Electron density anomalies associated with $M \geq 5.9$ earthquakes in Indonesia during 2005 observed by DEMETER, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73 (16), 2289-2299, doi:10.1016/j.jastp.2011.06.004
133. He, Y., Yang, D., Qian, J., and Parrot, M. Response of the ionospheric electron density to different types of seismic events, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2173-2180, doi:10.5194/nhess-11-2173-2011, 2011.
134. Pisa, D., M. Parrot, and O. Santolik (2011) Ionospheric density variations recorded before the 2010 Mw 8.8 earthquake in Chile, *J. Geophys. Res.*, 116, A08309, doi:10.1029/2011JA016611.
135. Zhu Tao. A preliminary study on characteristics of average power spectrum density of LF/MF electric field observed by DEMETER satellite, *ACTA SEISMOLOGICA SINICA*, 2010, 32(4).
136. Yufei He, Dongmei Yang, Rong Zhu, Jiadong Qian and M. Parrot, Variations of electron density and temperature in ionosphere based on the DEMETER ISL data, *Earthquake Science*, 23(4), 349-355, DOI: 10.1007/s11589-010-0732-8, 2010.
137. Xuemin Zhang; Xuhui Shen; Jing Liu; Xinyan Ouyang; Jiadong Qian; Shufan Zhao, Ionospheric perturbations of electron density before the Wenchuan Earthquake *International Journal of Remote Sensing*, 31:13, 3559 - 3569, 2010.

138. Akhoondzadeh, M., Parrot, M., and Saradjian, M. R., Electron and ion density variations before strong earthquakes ($M > 6.0$) using DEMETER and GPS data, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 7-18, 2010.
139. V.L. Frolov, V.O. Rapoport, G.P. Komrakov, A. S. Belov, G. A. Markov, M. Parrot, J. L. Rauch and E. V. Mishin, Satellite measurements of plasma-density perturbations induced in the topside ionosphere by high-power HF radio waves from the oSura heating facility, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 51(11), 825-833, 2008.
140. V.O. Rapoport, V. L. Frolov, G.P. Komrakov, G. A. Markov, A. S. Belov, M. Parrot, and J. L. Rauch (2007). Some results of measuring the characteristics of electromagnetic and plasma disturbances stimulated in the outer ionosphere by high-power high-frequency radio emission from the Sura facility, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 50(8), 645-656, 2007.
141. Bell, T. F., U. S. Inan, D. Piddiyachiy, P. Kulkarni, and M. Parrot (2008), Effects of plasma density irregularities on the pitch angle scattering of radiation belt electrons by signals from ground based VLF transmitters, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L19103, doi:10.1029/2008GL034834.
142. V. L. Frolov, V. O. Rapoport, G. P. Komrakov, A. S. Belov, G. A. Markov, M. Parrot, J. L. Rauch and E. V. Mishin (2008), Density Ducts Formed by Heating the Earth's Ionosphere with High-Power HF Radio Waves, *JETP Letters*, 2008, Vol. 88, No. 12, pp. 790794.