

Общая физика

УДК 53.083.2

Резонансная ближнеполюсная СВЧ-диагностика неоднородных сред

Д. В. Янин, А. Г. Галка, А. И. Смирнов, А. В. Костров, А. В. Стриковский

Статья посвящена развитию и экспериментальной реализации метода резонансного ближнеполюсного подповерхностного СВЧ-зондирования неоднородных сред. В основе этой диагностики лежит зависимость импеданса электрически малой антенны от электродинамических параметров окружающей среды. Если антенна включена в качестве нагрузки в резонансную систему, то по смещению резонансной частоты и изменению добротности можно судить об интегральных значениях диэлектрической проницаемости и проводимости среды в ближнем поле антенного устройства. Для подповерхностной диагностики (томографии) неоднородностей требуется изменять эффективную глубину зондирования или, другими словами, характерный масштаб локализации квазистатического электрического поля в среде. В отличие от волновых методов, ближнеполюсная СВЧ-диагностика позволяет реализовать субволновое разрешение. В статье обсуждаются конкретные примеры реализации устройств, предназначенных для бесконтактной диагностики плазмы в разрезах атмосферного давления, контрастных диэлектрических объектов и патологических изменений в биологических тканях.

PACS: 87.19.Rf, 52.70.Gw

Ключевые слова: квазистатическое электрическое поле, резонанс, диагностика, диэлектрическая проницаемость, проводимость, плазма, неоднородные среды, биологические ткани.

Введение

Задачи диагностики неоднородных сред остаются на протяжении многих десятилетий актуальными в самых различных областях науки и техники. Спектр задач, где требуется детальное знание о параметрах самых различных объектов, давно уже вышел за пределы собственно физики и включает в себя такие приложения, как геологоразведка, материаловедение, дефектоскопия, медицина и др. Для указанных приложений часто необходимо создание бесконтактных методов диагностики в силу труднодоступности и удаленности

диагностируемых объектов (например, в задачах дефектоскопии и геологоразведки), а также с целью избежать нежелательные последствия от внешних контактов (в задачах биологии и медицины).

С самого начала развитие бесконтактных методов диагностики связывалось с применением различных волновых процессов (в основном, электромагнитных и акустических). В общем случае варьирование физической природы используемых волн и их частоты позволяет достаточно успешно управлять дистанцией и пространственным разрешением, но при стандартном использовании волновых пучков возникают определенные фундаментальные ограничения. Обычно для повышения пространственного разрешения зондирования объекта стремятся уменьшить длину волны зондирующего излучения. Однако переход к более коротким волнам может сопровождаться уменьшением контраста и снижением доступной глубины зондирования, а в случае предельно коротких волн (связанного с использованием рентгеновского излучения) возрастет риск повреждения живых тканей. Широкие возможности на пути совершенствования бесконтактных методов диагностики открывает использование так называемого резонансного ближнеполюсного СВЧ-зондирования,

Янин Дмитрий Валентинович, научный сотрудник¹.
Галка Александр Георгиевич, младший научный сотрудник¹.
Смирнов Александр Ильич, зав. отделом^{1,2}.
Костров Александр Владимирович, зав. лабораторией¹.
Стриковский Аскольд Витальевич, научный сотрудник¹.

¹Институт прикладной физики РАН.

Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

Тел. +7 (831) 436-80-71.

E-mail: dyanin@appl.sci-nnov.ru; door_s@mail.ru

²Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского.

Россия, 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2014 г.

© Янин Д. В., Галка А. Г., Смирнов А. И., Костров А. В., Стриковский А. В., 2014

позволяющего исследовать пространственное распределение комплексной диэлектрической проницаемости объектов с разрешением существенно меньше, чем длина волны излучения.

Поясним основные принципы, на которых базируется резонансная ближнеполюсная СВЧ-диагностика. Область среды, находящейся 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 электродинамических характеристиках среды вблизи антенного устройства. Для целей подповерхностного зондирования (ближнеполюсной томографии) неоднородностей система должна быть модифицирована таким образом, чтобы можно было изменять эффективную глубину зондирования или характерный масштаб локализации квазистатического электрического поля в среде. Для томографии трёхмерно неоднородной среды, основанной на методах одномерной подповерхностной диагностики, измерения должны быть дополнены двумерным сканированием вдоль поверхности. Исходными данными при решении обратной задачи резонансной ближнеполюсной СВЧ-томографии являются результаты измерения резонансных характеристик датчика при двумерном сканировании над поверхностью среды его измерительной части, представляющей собой систему электрически малых антенн с разными глубинами зондирования. Ближнеполюсная СВЧ-томография, в отличие от волновых методов, позволяет восстанавливать субволновые детали неоднородностей параметров среды.

Для обеспечения гарантированной точности и достоверности определения электрофизических характеристик материальных сред требуется соответствующая инструментальная база, учитывающая специфические особенности диагностируемых объектов. Это заставляет взглянуть под новым углом на многие, ставшие уже классическими, методы измерений электродинамических характеристик с помощью резонаторов на отрезке коаксиальных и двухпроводных линий передач [1]. Основное достоинство данных устройств — их миниатюрность, высокая чувствительность, а также простота в изготовлении, широкие функциональные возможности и разнообразие конструкторских решений.

В статье обсуждаются конкретные примеры реализации устройств, предназначенных для бесконтактной диагностики плазмы в разрядах атмосферного давления, контрастных диэлектрических объектов и патологических изменений в биологических тканях.

Бесконтактная диагностика плазмы атмосферного давления

Датчик для измерения параметров плазмы атмосферного давления, схематически изображенный на рис. 1, представлял собой резонатор, состоящий из двух последовательно соединенных отрезков двухпроводной линии с волновыми сопротивлениями $\rho = 300$ Ом и $\rho_m = 350$ Ом. Длина отрезков $l = 290$ мм и $l_m = 20$ мм, расстояния между проводами, соответственно, $d = 6$ мм и $d_m = 9$ мм. Участок резонатора с большим волновым сопротивлением являлся измерительной частью датчика. Возбуждение резонансной системы и прием ее отклика осуществлялись двумя коаксиальными линиями с волновым сопротивлением $\rho_c = 50$ Ом через петли магнитной связи диаметром 10 мм. Собственная резонансная частота датчика составляла 660 МГц, добротность системы порядка 100.

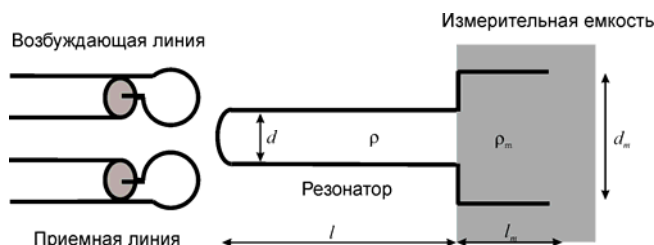


Рис. 1. Схематическое изображение резонансного датчика для измерения параметров плазмы атмосферного давления

При проведении экспериментов измерительная часть датчика прикладывалась к кварцевой стенке газоразрядной камеры. Наличие плазмы в области квазистатического поля измерительной части приводило к изменению собственной частоты и добротности резонатора. Резонатор возбуждался при помощи генератора качающейся частоты (ГКЧ). Диапазон изменения частоты позволял записывать резонансную характеристику датчика за один период качания, который составлял $T_k = 0,076$ с. Анализируя последовательность резонансных кривых, получаемых в течение разряда, можно было исследовать динамику параметров плазмы с временным разрешением, близким к периоду качания частоты T_k . Сигнал с приемной линии датчика подавался на детектор, после чего регистрировался цифровым осциллографом и обрабатывался на персональном компьютере. Синхронизация эксперимента осуществлялась сигналом пилообразного напряжения, формировавшимся в схеме управления ГКЧ, и воспроизводившим зависимость частоты ГКЧ от времени. Для защиты измерительных цепей от помех, обусловленных работой ВЧ генератора плазмы, в возбуждающие и приемные линии датчика были включены фильтры.

Исследования плазмы атмосферного давления выполнялись на специально разработанной для этой цели экспериментальной установке (подробное описание установки представлено в работе [2]). Для создания плазмы использовался ламповый парафазный высокочастотный (ВЧ) автогенератор с рабочей частотой 13,56 МГц и максимальной выходной мощностью 7 кВт. Выход ВЧ-генератора через устройство согласования нагружался на два кольцевых электрода диаметром 23 мм, охватывающих кварцевую разрядную трубку с внешним диаметром 20 мм и толщиной стенок 2 мм; расстояние между электродами составляло 350 мм. В центральную часть трубки была впаяна рабочая секция, в виде кварцевого параллелепипеда размерами 50×50×12 мм, к стенке которого прикладывалась измерительная часть датчика. Газ атмосферного давления (аргон) напускался через один из торцов разрядной трубки. Для инициации разряда в трубку вводились дополнительные электроды, к которым прикладывался импульс высокого напряжения. Ионизация рабочего газа происходила в результате высокочастотного емкостного разряда. Система согласования ВЧ-тракта с нагрузкой позволяла вводить в разряд до 50 % выходной мощности ВЧ-генератора. Разряд зажигался в импульсно-периодическом режиме, длительность ВЧ-импульсов составляла 1,2 с при периоде повторения 50 с. В качестве источника питания ВЧ-генератора использовался высоковольтный емкостной накопитель. Длительность ионизирующего импульса определялась временем разряда накопителя. Форма импульса ВЧ-напряжения, амплитуда которого экспоненциально уменьшалась с течением времени, позволяла за один цикл работы установки изменять концентрацию плазмы в широком диапазоне значений.

Математическое описание работы датчика, согласно [3], сводится к решению системы телеграфных уравнений для комплексных амплитуд тока I и напряжения U в резонаторе:

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dx} &= -i\omega L_0 I + E\delta(x+0) \\ \frac{dI}{dx} &= -i\omega C_0 U \end{aligned} \quad (1)$$

с граничными условиями

$$U|_{x=0} = 0; \quad \frac{dI}{dx}|_{x=0} = 0; \quad \frac{I}{U}|_{x=l} = Y_x^{(0)} + Y_x^{(1)} \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) использованы следующие обозначения: L_0 и C_0 — погонная индуктивность и емкость двухпроводной линии; $E = -i\omega M(I_1 + I_2)$ — сосредоточенная вблизи закор-

ченного конца $x = 0$ ЭДС взаимной индукции; M — коэффициент взаимной индукции между петлями связи и двухпроводной линией; I_1 и I_2 — комплексные амплитуды токов в передающей и приемной петлях связи соответственно; $Y_x^{(0)}$ — адмитанс измерительной части резонатора при контакте со стенкой разрядной трубки без плазмы, $Y_x^{(0)} \ll \rho^{-1}$; $Y_x^{(1)}$ — поправка к адмитансу измерительной части, связанная с наличием плазмы, $Y_x^{(1)} \ll Y_x^{(0)}$. Индуктивное сопротивление петель связи ωL_c мало по сравнению с волновым сопротивлением коаксиального кабеля ρ_c ($\omega L_c \ll \rho_c$), L_c близка по величине к M . Учитывая наводимую в передающей петле связи ЭДС в виде $-i\omega M/\rho_c$, можно получить следующие выражения для токов I_1 и I_2 :

$$I_1 = 2I_0 - i\frac{\omega M}{\rho_c} I, \quad I_2 = -i\frac{\omega M}{\rho_c} I, \quad I_0 = i\frac{U_0}{\rho_c} \quad (3)$$

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

Решение задачи (1)–(3) на частотах ω , близких к вакуумной резонансной частоте ω_0 , ($\omega = \omega_0 + \Delta\omega$, $|\Delta\omega| \ll \omega_0$), будем искать в виде асимптотического ряда по малому параметру γ :

$$I = I^{(0)} + I^{(1)} + \dots, \quad U = U^{(0)} + U^{(1)} + \dots \quad (4)$$

$$\gamma \sim \max \left\{ \frac{|\Delta\omega|}{\omega_0}, \left(Y_x^{(1)} \rho \right), \left(\frac{\omega M}{\rho} \right)^2, \left(\frac{\omega M}{\rho_c} \right)^2, \left| \frac{I}{I_0} \right| \right\} \ll 1. \quad (5)$$

В первом порядке теории возмущений можно получить следующее выражение для напряжения в приёмной петле связи.

$$\begin{aligned} U_3(\omega) &= \\ &= U_0 \left[\left(\frac{4}{\pi} Q_0 \right)^2 (\delta\omega \cdot \beta + \text{Im}(q))^2 + \left(1 + \frac{4}{\pi} Q_0 \text{Re}(q) \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (6)$$

где $\delta\omega = \Delta\omega/\omega_0$, $\alpha = \omega_0 M/\rho$, $\alpha_c = \omega_0 M/\rho_c$, $Q_0 = \pi/(8\alpha\alpha_c)$ — собственная добротность резонатора.

$$\begin{aligned} q &= Y_x^{(1)} \rho \sin \left(2 \frac{\omega_0}{c} l \right); \\ \beta &= \frac{\omega_0}{c} l + \frac{\rho \text{Im} Y_x^{(0)}}{1 + (\rho \text{Im} Y_x^{(0)})^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Выражение (6) представляет собой уравнение резонансной кривой датчика. Параметр q зависит от поправки Y_x^1 к адмитансу измерительной части

и определяет сдвиг резонансной частоты датчика и амплитуду сигнала на резонансной частоте

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = -\frac{\text{Im}(q)}{\beta}, \quad (8)$$

$$\max(U_3) = U_0 \left(1 + \frac{4}{\pi} Q_0 \text{Re}(q) \right)^{-1}. \quad (9)$$

Для нахождения Y_x^1 можно воспользоваться методом изображений [3]. Рассмотрим два параллельных провода с радиусом a и линейной плотностью заряда $+\chi$ и $-\chi$ расположенные на поверхности кварцевой разрядной трубки (рис. 2). Поскольку толщина плазменного слоя в разрядной трубке больше максимальной глубины зондирования измерительного датчика, в математической модели рабочий участок разрядной трубки можно рассматривать в виде плоского слоя кварцевого стекла и полупространства, занимаемого плазмой. Введём следующие обозначения: ϵ_g и h — соответственно диэлектрическая проницаемость и толщина кварцевой стенки разрядной камеры, ϵ_p — комплексная диэлектрическая проницаемость плазмы, ϵ_v — диэлектрическая проницаемость среды вне разрядной трубки, d_m — расстояние между проводами.

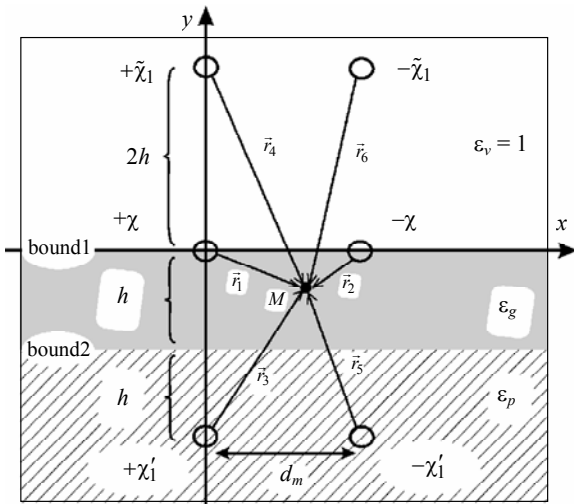


Рис. 2. Иллюстрация метода изображений для трёхслойной среды: два параллельных провода χ и $-\chi$ на границе раздела сред с ϵ_g и ϵ_v . В первом приближении учитываются нити изображения $+\chi_1$, $+\tilde{\chi}_1$, $-\chi_1$ и $-\tilde{\chi}_1$. Положения проводов и нитей изображения на рисунках отмечены окружностями

В соответствии с методом изображений, поле поляризационных зарядов от каждого провода в кварцевом стекле можно записать в виде бесконечной системы полей разноимённо заряженных фиктивных нитей, расположенных зеркально симметрично проводам относительно границ стекло-воздух, стекло-плазма. С увеличением номера ни-

тей изображения уменьшается вклад, вносимый ими в напряженность электрического поля в окрестности провода.

При расчёте поля \vec{E} в кварцевом стекле, в первом приближении достаточно учитывать только четыре нити изображения с плотностями заряда $+\chi_1$, $-\chi_1$, $+\tilde{\chi}_1$ и $-\tilde{\chi}_1$.

$$\chi_1' \Big|_{y=-2h} = \chi \frac{2(\epsilon_g - \epsilon_p)}{(\epsilon_g + \epsilon_v)(\epsilon_g + \epsilon_p)}, \quad (10)$$

$$\tilde{\chi}_1 \Big|_{y=2h} = 2\chi \frac{(\epsilon_g - \epsilon_p)(\epsilon_g - \epsilon_v)}{(\epsilon_g + \epsilon_p)(\epsilon_g + \epsilon_v)^2},$$

$$\vec{E} = \frac{2\chi \vec{r}_1}{\epsilon_g r_1^2} - \frac{2\chi \vec{r}_2}{\epsilon_g r_2^2} + \frac{2\chi_1' \vec{r}_3}{\epsilon_g r_3^2} + \frac{2\tilde{\chi}_1 \vec{r}_4}{\epsilon_g r_4^2} - \frac{2\chi_1' \vec{r}_5}{\epsilon_g r_5^2} - \frac{2\tilde{\chi}_1 \vec{r}_6}{\epsilon_g r_6^2}, \quad (11)$$

где \vec{r}_1 и \vec{r}_2 — двумерные радиус-векторы, отсчитываемые от проводов с линейной плотностью заряда $+\chi$ и $-\chi$ в рассматриваемую точку пространства, \vec{r}_3 , \vec{r}_4 , \vec{r}_5 , \vec{r}_6 — от нитей изображений $+\chi_1$, $+\tilde{\chi}_1$, $-\chi_1$ и $-\tilde{\chi}_1$, соответственно. Зная напряженность электрического поля в кварцевом стекле, находим разность потенциалов между проводами

$$U = \int_{a/2}^{d_m - a/2} E_x(x, y=0) dx, \text{ а следовательно, величину погонной емкости } C = \chi / U.$$

Если C_0 — погонная ёмкость проводов в вакууме, то $C = C_0 \epsilon_{eff}$, где ϵ_{eff} — эффективная диэлектрическая проницаемость:

$$\epsilon_{eff}(\epsilon_g, \epsilon_p, \epsilon_v, h) = \frac{\epsilon_g + 1}{2 + \left[\frac{2\epsilon_g}{\epsilon_g + 1} \right] \left[\frac{\epsilon_g - \epsilon_p}{\epsilon_g + \epsilon_p} \right] \ln \left(\frac{d_m^2 + (2h)^2}{a^2 + (2h)^2} \right) \ln^{-1} \left(\frac{d_m}{a} \right)}. \quad (12)$$

При заданной геометрии рабочей части разрядной трубки ϵ_{eff} зависит только от комплексной диэлектрической проницаемости ϵ_p плазмы,

$$\epsilon_p = \epsilon' - i\epsilon'', \quad \epsilon' = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + \nu^2};$$

$$\epsilon'' = \frac{\omega_{pe}^2 \nu}{(\omega^2 + \nu^2)\omega}; \quad \omega_p = \sqrt{\frac{4\pi e^2 N}{m}}, \quad (13)$$

где ω_p — плазменная частота, e и m — соответственно, заряд и масса электрона, N — концентрация

плазмы, ν — частота столкновения электрона с нейтральными частицами.

Поскольку электрическая длина измерительной части резонатора мала по сравнению с длиной волны излучения на частоте зондирующего поля, адмитансы $Y_x^{(0)}$ и $Y_x^{(1)}$ можно представить в виде:

$$Y_x^{(0)} = i\omega_0 l_m C_0 \varepsilon_{\text{eff}}(1);$$

$$Y_x^{(1)} = i\omega_0 l_m C_0 (\varepsilon_{\text{eff}}(\varepsilon_p) - \varepsilon_{\text{eff}}(1)) \quad (14)$$

Выражения (7)—(9), (12)—(14) образуют замкнутую систему уравнений, позволяющую по результатам измерений смещения резонансной частоты датчика и уменьшения добротности резонанса найти концентрацию плазмы N и частоту столкновений электронов ν с нейтральными частицами.

Область применимости уравнений (12)—(14) ограничена. Система позволяет независимо находить N и ν только в том случае, когда $|\varepsilon' - 1| \sim \varepsilon'' \sim \varepsilon_g$, что эквивалентно $\omega \sim \nu$, $\omega_p/\nu \sim \varepsilon_g$. При этом мнимая и действительная части импеданса, соответствующего плазменному промежутку, оказываются одного порядка с величиной емкостного импеданса стенок кварцевой разрядной трубки.

Для плазмы атмосферного давления такие условия не выполняются: рабочая частота измерительной системы оказывается много меньше частоты столкновений электронов с нейтралами, $\omega \ll \nu$, а $|\varepsilon'| \ll \varepsilon''$. При этом эффективная диэлектрическая проницаемость ε_{eff} , (см. (12)), от которой зависит поведение резонансной характеристики датчика, определяется только мнимой частью ε'' комплексной диэлектрической проницаемости плазмы, или величиной N/ν . Для нахождения N/ν в этом случае достаточно знать изменение амплитуды сигнала на резонансной частоте, и использовать (7), (9), (12)—(14).

Для применения развитой теории необходимо выполнение условий приближения квазиэлектростатики, которые в данном случае сводятся к превышению масштабом экранировки электромагнитного поля в плазме δ_{sk} (толщины скин-слоя) максимальной глубины зондирования h_z датчика, $\delta_{sk} > h_z$. Кроме того, наличие плазмы должно приводить к регистрируемым изменениям амплитуды сигнала при резонансе. Если разрешающая способность регистрирующей аппаратуры по напряжению ΔU , то $U_0 - \max(U_3) > \Delta U$. С учётом этого для плазмы атмосферного давления можно получить диапазон регистрируемых значений N/ν :

$$\frac{m}{8e^2 Q_0} \frac{\Delta U}{U_0} \frac{1}{l_m C_0 \rho} < \frac{N}{\nu} < \frac{m}{4\pi e^2} \frac{c^2}{\omega d_m^2} \quad (\nu \gg \omega). \quad (15)$$

Для используемой в экспериментах измерительной системы $0,5 \text{ см}^{-3}\text{с} < N/\nu < 150 \text{ см}^{-3}\text{с}$, то есть динамический диапазон измерений отношения N/ν превышает два порядка.

Для нахождения значений N и ν необходимо дополнительное соотношение, связывающее эти величины. Для его нахождения воспользуемся уравнением баланса энергии. При температуре электронов T_e , существенно превышающей температуру ионов T_i , энергия E , запасённая в плазме, определяется электронной компонентой,

$$E = NkT_e V. \quad (16)$$

Потери энергии могут происходить как за счёт уменьшения температуры электронов и ионов, так и за счёт потерь заряженных частиц в объёме, занимаемом плазмой (уменьшения концентрации). В случае стационарного разряда мощность P , вкладываемая в разряд, компенсирует потери энергии,

$$P = E\nu_E, \quad (17)$$

где ν_E — декремент затухания энергии электронов.

Основные механизмы потерь энергии — это диффузионный уход заряженных частиц из плазменного объёма с последующей поверхностной рекомбинацией на стенках камеры, рекомбинация в объёме, энергетические потери за счёт упругих столкновений электронов с нейтралами, а также потери за счёт передачи тепла стенкам разрядной трубки путем теплопроводности. Соответственно,

$$\nu_E = \nu_D + \nu_T + \nu_R + \nu_{\text{Coll}}, \quad (18)$$

где ν_D , ν_T , ν_R , ν_{Coll} — характеризуют соответственно потери за счёт диффузии, теплопроводности, рекомбинации и столкновений электронов с нейтральными частицами.

В случае, когда доминирующий механизм потери энергии обусловлен столкновениями электронной с нейтральными частицами (для разрядов высокого давления это, как правило, имеет место), имеем:

$$\nu_{\text{Coll}} = \nu\delta, \quad (19)$$

где δ — доля теряемой электроном энергии при столкновении с нейтральной частицей. В случае упругих столкновений δ равно удвоенному отношению массы электрона m к массе нейтральной частицы M , $\delta = 2m/M$. С учётом этого, из (17) трудно получить искомое соотношение, с помощью которого по результатам ближнепольных измерений можно найти значения N и ν в ходе разряда:

$$N\nu = \frac{P}{kT_e V \delta}. \quad (20)$$

Таким образом, для бесконтактной диагностики плазмы атмосферного давления необходимо привлекать результаты дополнительных измерений мощности P , поглощаемой в разряде (как доли от полной мощности плазмоздающего генератора).

Экспериментальные результаты по бесконтактной диагностике параметров плазмы в разряде при атмосферном давлении

На рис. 3, *а* приведена зависимость мощности, поглощаемой в плазменном объеме за один цикл работы плазмоздающего ВЧ-генератора, от времени. Максимальная мощность, вкладываемая в разряд, составляет величину порядка 2 кВт и соответствует началу пробоя. Далее за счёт снижения напряжения на емкостном накопителе происходит монотонное уменьшение ВЧ-мощности.

На рис. 3, *б* представлена осциллограмма сигнала с диагностического датчика и синхронизационного сигнала пилообразного напряжения ГКЧ при исследовании параметров плазмы в разрядной трубке.

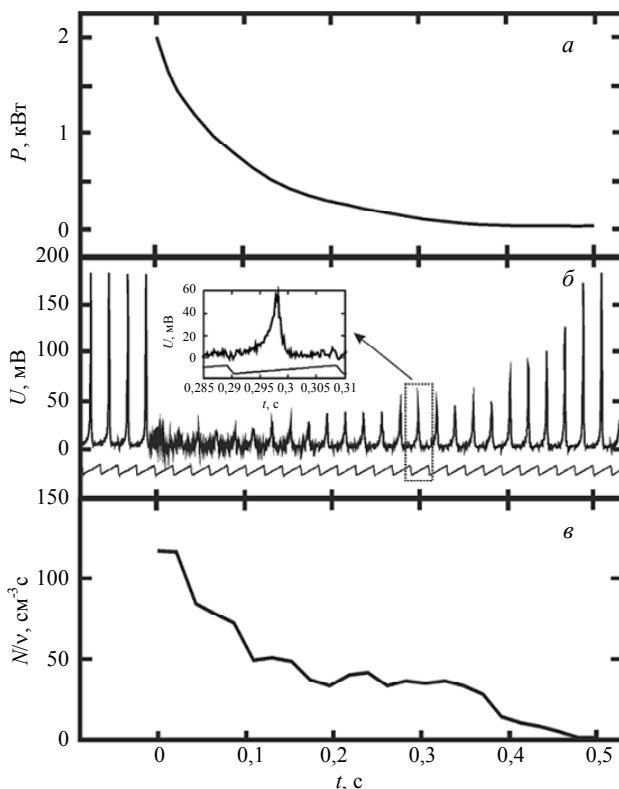


Рис. 3. Экспериментальные результаты по бесконтактной диагностике параметров плазмы в разряде при атмосферном давлении:
а — временная зависимость мощности ВЧ-импульса, поглощаемой в плазменном объеме;
б — осциллограмма сигнала с резонансного датчика (верхняя кривая) и синхронизационного сигнала пилообразного напряжения свип-генератора (нижняя кривая) при исследовании параметров плазмы во время разряда;
в — зависимость отношения N/v от времени

Зависимость отношения концентрации плазмы к электронной частоте столкновений N/v от времени, полученная при обработке осциллограмм сигнала с резонансного датчика представлена на рис. 3, *в*. В начале ВЧ-пробоя N/v достигает максимального значения $120 \text{ см}^3 \cdot \text{с}$, затем монотонно уменьшается, и через 0,5 с после начала разряда составляет величину порядка $1 \text{ см}^3 \cdot \text{с}$. При обработке предполагалось, что плазма однородна по сечению разряда и полностью заполняет кварцевую трубку. Очевидно, что учет конечной толщины пристеночного переходного слоя позволил бы более точно определить значения N/v в центральной части разряда, которые, по-видимому, в 1,5—2 раза больше, чем приводимые данные.

В работе [2] были выполнены расчёты максимальных декрементов затухания энергии электронов для каждого из указанных выше механизмов на начальной стадии пробоя. Результаты этих расчетов показали, что в разряде трубке преобладает механизм потерь энергии, связанный с упругими столкновениям электронов с нейтральными частицами, а температура электронов T_e порядка 1 эВ. При известной мощности, вкладываемой в разряд (см. рис. 3, *а*), с помощью выражения (20) можно оценить зависимости концентрации плазмы и электронной частоты столкновений от времени по экспериментально найденным значениям N/v , которые представлены на рис. 4.

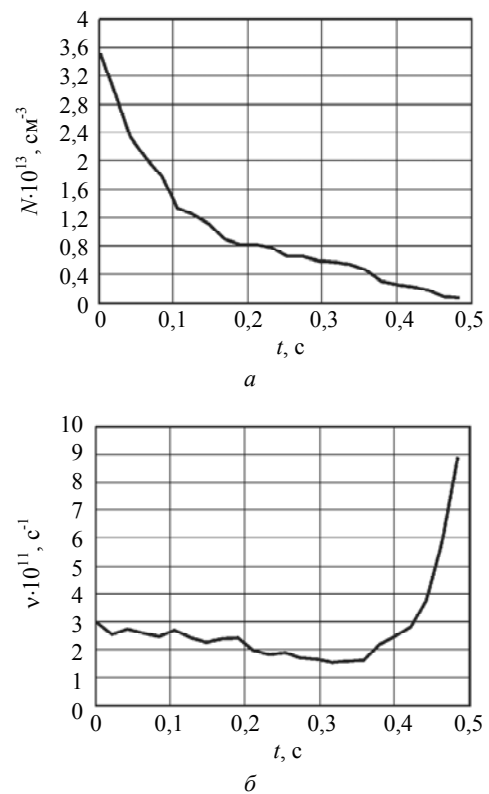


Рис. 4. Результаты измерений параметров плазмы: зависимость концентрации плазмы N и электронной частоты столкновений ν от времени

Как следует из графиков на рис. 4, в начале ВЧ-пробоя концентрация плазмы в разрядной трубке достигает значения $N \sim 3,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, затем монотонно уменьшается и через 0,5 с после начала разряда составляет величину $N < 7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Частота столкновений электронов с нейтральными частицами в течение разряда почти постоянна, а именно $\nu \sim 2 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, однако к концу разряда, когда амплитуда сигнала на выходе плазмоздающего ВЧ-генератора существенно снижается, из-за остывания нейтрального газа наблюдается рост электронной частоты столкновений.

Результаты измерений параметров плазмы в разряде методом ближнеполюсного СВЧ-зондирования по порядку величины совпадают с теоретическими оценками и с данными, полученными методом многочастотного просвечивания плазмы (см. работу [2]), что подтверждает правильность ближнеполюсных измерений.

Подповерхностная диагностика сред с локализованными квазиодномерными неоднородностями

В качестве базовой измерительной системы для подповерхностной диагностики неоднородных сред может быть выбран такой же датчик, как и для бесконтактной диагностики плазмы атмосферного давления, т. е. с измерительной емкостью в виде двух параллельных проводов. Для него можно в полной мере использовать уже развитый в предыдущих разделах математический аппарат. Информацию о подповерхностной структуре объекта в рамках ближнеполюсной диагностики можно получить путем глубинного зондирования среды квазистатическим электрическим полем. Для этого нами была изготовлена система резонансных измерительных систем с разными расстояниями d_m между проводами измерительной емкости ($d_m = 3; 5; 7,5; 8,5; 10; 13; 17; 20; 24,5 \text{ мм}$), которые были закреплены на поверхности прямоугольной подложки из органического стекла ($\epsilon = 3,5$) размером плоскости $40 \times 100 \text{ мм}$ и с толщиной 100 мм . Расстояние d_m между проводами определяет характерный масштаб локализации поля вблизи них и примерно совпадает с максимальной глубиной зондирования системы [4]. По данным измерений резонансной характеристики зонда можно найти эффективную диэлектрическую проницаемость ϵ_{eff} среды в приповерхностном слое толщиной h_{zond} (для используемых датчиков $h_{\text{zond}} \sim d_m$). Измерение ϵ_{eff} при различных значениях h_{zond} позволяет извлекать информацию о диэлектрической проницаемости с разных глубин и восстанавливать ее глубинный профиль.

В общем случае для неоднородного полупространства эта обратная задача чрезвычайно сложна, является некорректной и требует применения методов регуляризации, основанных на использовании дополнительной априорной информации о точном решении [5, 6]. Но здесь рассматривается случай диэлектрических сред без потерь, содержащих инородные включения в виде вытянутых параллелепипедов с длиной, превышающей характерный масштаб локализации поля измерительной емкости применяемых датчиков. Кроме этого, на толщину и глубину залегания таких неоднородностей накладывались следующие ограничения. Необходимо, чтобы глубина зондирования для нескольких датчиков (как минимум трех) была меньше, чем расстояние до нижней границы исследуемой неоднородности, но превышала бы глубину ее залегания. Используя такую априорную информацию, удастся разработать упрощенную схему решения обратной задачи по восстановлению диэлектрической проницаемости неоднородности, ее продольных размеров, а также верхней и даже (правда, с гораздо меньшей точностью) нижней границ залегания и продемонстрировать возможности метода ближнеполюсной диагностики.

В экспериментах в качестве инородного включения использовались прямоугольные параллелепипеды, вырезанные из стекла ($\epsilon_2 = 7,5$), органического стекла ($\epsilon_2 = 3,5$) и тефлона ($\epsilon_2 = 2,1$). Они располагались в пенопласте ($\epsilon_1 = 1$) на глубинах $h = 2,2, 3,5$ и $5,5 \text{ мм}$. У всех используемых параллелепипедов толщина D составляла 20 мм , ширина S — 150 мм , длины L для каждого из материалов — $115, 125$ и 135 мм .

Диагностика неоднородностей происходила в три этапа: 1) обнаружение присутствия в образце инородного включения, определение его горизонтальных размеров (длины, ширины) и диэлектрической проницаемости ϵ_1 среды, в которой оно располагается; 2) определение электродинамических характеристик неоднородности и ее верхней границы залегания; 3) оценка положения нижней границы неоднородности.

На первом этапе датчик с глубиной зондирования $24,5 \text{ мм}$, превышающей глубину залегания неоднородности, перемещался вдоль плоской поверхности среды в направлении ox , затем в направлении oy (рис. 5). При этом фиксировалась величина сдвига резонансной частоты в зависимости от положения центра измерительной емкости. В момент, когда измерительная емкость заходит в область неоднородности, резонансная частота f начинает сдвигаться; далее, когда зонд целиком находится над неоднородным участком, f перестает изменяться (см. рис. 5).

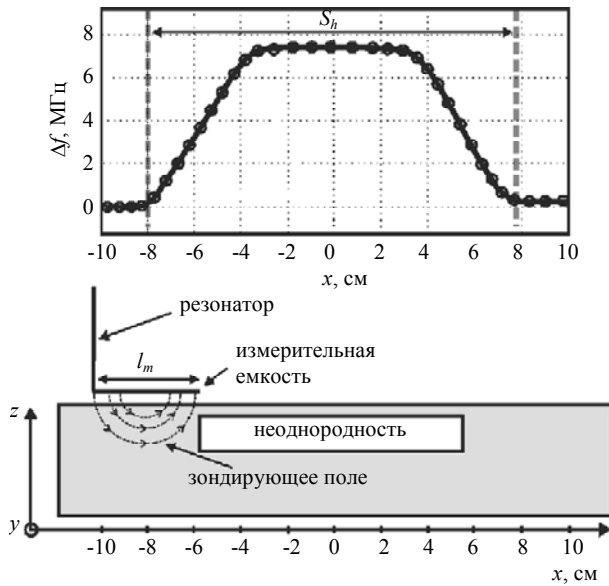


Рис. 5. Зависимость сдвига резонансной частоты Δf от координаты x середины измерительной емкости датчика при исследовании прямоугольной неоднородности в виде тefлона длиной 115 мм, шириной 150 мм, толщиной 23 мм, расположенной на глубине 3 мм в пенопласте. Глубина зондирования датчика — 24,5 мм. Длина L неоднородности равна разности между длиной “холмика” s_h на графике сдвига резонансной частоты и длиной l_m проводов измерительной емкости

Такой характер поведения резонансной частоты позволяет определить характерные размеры неоднородности в плоскости xu . Они находятся по разности между длинами проводов l_m измерительной емкости и “холмика” S_h на графике зависимости резонансной частоты от координаты при перемещении датчика вдоль взаимно перпендикулярных осей x и y . Заметим, что экспериментально полученные размеры неоднородного участка слегка превышают их истинные значения (см. таблицу). Это связано с краевым эффектом, из-за которого резонансная частота датчика начинает изменяться еще до того, как измерительная емкость пересекает линию над границей области неоднородности. Диэлектрическую проницаемость ϵ_1 можно найти с помощью соотношений (7)—(9), (14) по измеренному значению резонансной частоты датчика вне области неоднородности, где в (14) $\epsilon_{eff} = (\epsilon_1 + \epsilon_3)/2$, ϵ_3 — диэлектрическая проницаемость подложки, на которой закреплены провода измерительной емкости.

На втором этапе используется уже априорная информация о глубине $D+h$ залегания нижней границы неоднородности. Она позволяет применять для изучения электродинамических характеристик инородного включения датчика с максимальными глубинами зондирования h_{zond} меньше, чем $D+h$. Если расположить их над центральной областью неоднородности, то при выполнении условия $h_{zond} < D+h$ можно рассматривать среду как двух-

слойную и воспользоваться для решения обратной задачи соотношением (12).

В процессе измерений фиксировалась резонансная частота измерительных систем, измерительные емкости которых находятся в непосредственном контакте с поверхностью среды. Для каждого зонда по измеренному сдвигу резонансной частоты с помощью соотношений (7)—(9), (14) определялась эффективная диэлектрическая проницаемость среды ϵ_{eff}^{ex} . Экспериментальная зависимость $\epsilon_{eff}^{ex}(d_m)$ представлена на рис. 6 точками. Для нахождения диэлектрической проницаемости неоднородности ϵ_2 и верхней границы ее залегания h минимизировалась функция $F(\epsilon_1, \epsilon_2, h)$, представляющая собой среднее квадратичное отклонение между экспериментально найденными значениями ϵ_{eff}^{ex} и теоретической зависимостью $\epsilon_{eff}(\epsilon_1, \epsilon_2, h, d_m)$, соответствующей двухслойной среде:

$$F(\epsilon_1, \epsilon_2, h) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\epsilon_{eff}^{ex}(d_{mi}) - \epsilon_{eff}(\epsilon_1, \epsilon_2, h, d_{mi}) \right)^2}$$

где n — число измерительных зондов с максимальными глубинами зондирования меньше $h+D$. Процесс минимизации $F(\epsilon_1, \epsilon_2, h)$ сводится к тому, что численно подбирались такие значения ϵ_2 и h при известном значении ϵ_1 , для которых теоретическая кривая наилучшим образом ложилась на экспериментальные точки (см. рис. 6 — сплошная линия). Для этой цели использовался Nelder-Mead simplex algorithm, имеющий открытый код на языке MatLab. Стоит отметить, что используемый подход для определения ϵ_2 и h является стандартным инструментом в задачах оптимизации и находит применение в различных областях физики.

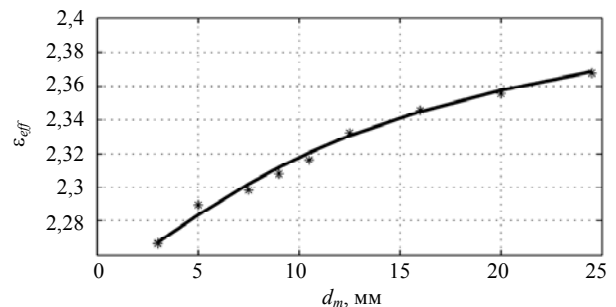


Рис. 6. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_{eff} от расстояния d_m между проводами измерительной емкости датчиков при исследовании неоднородности в виде тefлона длиной 115 мм, шириной 150 мм, толщиной 23 мм, расположенной на глубине 3 мм в пенопласте. Измерительные датчики располагались в центральной области неоднородности. Точками отмечены экспериментальные данные, сплошная кривая — теоретическая зависимость, соответствующая (12) для найденных значений ϵ_1, ϵ_2 и h

В принципе, для нахождения диэлектрической проницаемости неоднородности ε_2 и верхней границы ее залегания h достаточно только двух датчиков с максимальными глубинами зондирования меньше $D+h$. Однако чтобы повысить точность измерений при наличии случайных ошибок и применить статистический подход, нужно использовать большее количество датчиков (как минимум, 5—6).

На третьем этапе для оценки положения нижней границы неоднородности $D+h$ было введено понятие эталонной среды, для которой заранее известен сдвиг резонансной частоты для каждого из применяемых датчиков. В качестве такого эталона мы использовали полупространство с диэлектрической проницаемостью ε_2 , на поверхности которого находится слой с диэлектрической проницаемостью ε_1 и толщиной, равной глубине залегания h исследуемой неоднородности. По сути дела, эталон сравнения получается из исследуемой среды путём неограниченного увеличения длины и толщины рассматриваемого инородного включения.

При расположении в центральной области неоднородности датчиков с максимальными глубинами зондирования $h_{zond} < h+D$ показания измерительных систем будут совпадать со случаем эталонной среды. Для датчиков с $h_{zond} > h+D$ зондирующее электрическое поле проникает на глубину, где диэлектрическая проницаемость равна уже ε_1 , поэтому измеренный с их помощью сдвиг резонансной частоты будет несколько отличаться от эталонной ситуации. Именно этот момент позволяет зафиксировать нижнюю границу неоднородности.

На рис. 7 изображен сплошной кривой график сдвига резонансных частот Δf датчиков в зависимости от расстояния d между проводами их измерительных ёмкостей при исследовании прямоугольного объекта из тефлона (длиной 115 мм, шириной 150 мм, толщиной 23 мм), погруженного на глубину 3 мм в пенопласт. Видно, что, начиная с $d = 24,5$ мм, этот график идет ниже, чем соответствующая экспериментальная зависимость для эталона сравнения (пунктирная кривая), роль которого в эксперименте играет тефлон (толщиной 100 мм), покрытый слоем пенопласта толщиной 23 мм.

Отметим, что зависимость Δf для эталонной двухслойной среды можно рассчитать теоретически с помощью приведенных в статье формул (8), (12), (14). Однако используемые в наших экспериментах измерительные емкости не являются «идеальными» и отличаются друг от друга не только значениями d_m , но и другими параметрами (к при-

меру, “паразитной” емкостью в месте подключения измерительной части к резонатору). Это приводит к тому, что теоретическая зависимость Δf для эталонной среды сравнения отличается от экспериментальной кривой. В свою очередь, это влечет за собой некоторый разброс экспериментальных значений ε_{eff} (точки на рис. 7) относительно предсказываемых теорией (сплошная линия на рис. 7). К примеру, при $d_m = 5$ мм из рис. 6 следует отклонение $\Delta\varepsilon_{eff} \approx 0,01$. Данному $\Delta\varepsilon_{eff}$ в соответствии с приведенными в статье формулами отвечает разница $\Delta F \sim 1$ МГц между экспериментальным значением частоты датчика для трехслойной среды и теоретическим значением для среды сравнения. В области значений $d_m < 24,5$ мм расхождение между экспериментальной кривой Δf и теоретической кривой Δf для среды сравнения будет достигать 0,5—1 МГц, и это существенно затрудняет фиксацию толщины D исследуемой неоднородности. Однако при использовании более совершенных резонансных систем и измерительных емкостей (например, созданных на отрезках коаксиальных линий передач) численный расчет резонансного отклика датчиков для среды сравнения может быть успешно использован для диагностики нижней границы глубины залегания квазиодномерных инородных включений.

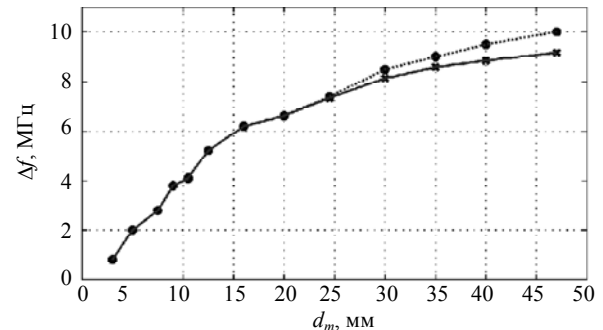


Рис. 7. Зависимость сдвига резонансной частоты Δf датчиков от расстояния d_m между проводами измерительной части датчиков при исследовании неоднородности в виде тефлона длиной 115 мм, шириной 150 мм, толщиной 23 мм, расположенной на глубине 3 мм в пенопласте — сплошная кривая. Пунктирная кривая — соответствует эталону сравнения (двухслойной среде, соответствующей неограниченному по длине и толщине исследуемому инородному включению). Датчики располагались над центром тефлонового образца. Для рассматриваемого случая показания измерительных систем начинают отличаться, начиная с $d_m = 24,5$ мм, что соответствует нижней границе тефлона

В таблицу сведены результаты измерений параметров сред с различными неоднородностями в форме прямоугольных параллелепипедов. Из нее видно, что отклонение между экспериментальными результатами и реальными параметрами неоднородностей в среднем не превышает 5 %.

Таблица

Реальные значения						Экспериментальные значения					
ε_1	ε_2	h , мм	L , мм	S , мм	D , мм	ε_1	ε_2	h , мм	L , мм	S , мм	D , мм
1	2,0	2,2	115	150	23	0,99	2,08	2,22	118	153	22,3
1	3,5	2,2	125	150	23	0,97	3,38	2,27	129	154	21,1
1	7,5	2,2	135	150	23	1,02	7,83	2,24	141	155	24,2
1	2,0	3,5	115	150	23	1,01	2,05	3,33	118	152	21,1
1	3,5	3,5	125	150	23	0,98	3,05	3,83	128	152	21,5
1	7,5	3,5	135	150	23	0,97	7,93	3,93	140	153	24,0
1	2,0	5,5	115	150	23	1,01	2,06	5,94	117	152	24,1
1	3,5	5,5	125	150	23	0,99	3,14	5,02	127	152	25,5
1	7,5	5,5	135	150	23	1,01	8,23	5,23	139	153	25,1

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 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. На основе ближнеполюсного СВЧ-зондирования можно так же развить экспресс-диагностику жизнеспособности органов при трансплантации.

При разработке диагностических датчиков для изучения биологических тканей необходимо учитывать их специфику и, в частности, эффект «прижима», обусловленный механическим контактом измерительной емкости с поверхностью биообъекта.

Эффект «прижима» можно охарактеризовать как зависимость показаний измерительного датчика от силы его давления на поверхность изучаемого объекта. Данный факт имеет место при ближнеполюсных 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» 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 другими эффектами, не связанными с контактной емкостью.

Биологические ткани, как правило, имеют неоднородную структуру по глубине. Под кожным

* Диагностика без проколов и разрезов кожи и тканей.

покровом располагается жировая прослойка, мышечная, костная ткань и т. д. 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). Контроль давления датчика можно осуществлять при помощи пружинного динамометрического устройства

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

Эффект «прижима» также связан с конструктивными особенностями измерительной емкости датчика и структурой ее электрического поля. Для измерений комплексной диэлектрической проницаемости биологических тканей обычно применяется импедансный подход. В качестве измерительного зонда, как правило, используется открытый конец коаксиального кабеля. Измеряя модуль и фазу коэффициента отражения от датчика на разных частотах при контакте с поверхностью изучаемого объекта, можно определить его диэлектрическую проницаемость и проводимость [7—9].

Как показали эксперименты, диагностика электродинамических характеристик биологических тканей с помощью открытого конца коаксиально кабеля крайне нежелательна. В такой конфигурации часть силовых линий электрического поля, берущих начало на торце центрального проводника, замыкаются на внешнюю поверхность оплетки коаксиала. Поэтому измерительная емкость не ограничивается торцом коаксиальной линии. При диагностике мягких тканей происходит неизбежная деформация поверхности (датчик как бы погружается вглубь среды), величина которой меняется в зависимости от силы давления датчика. При разной деформации меняется область заполнения электрического поля средой, а следовательно

но, и импеданс измерительной емкости. Поэтому необходимо, чтобы электрическое поле открытого конца коаксиала было сосредоточено исключительно на торце. Данное требование можно выполнить путем увеличения толщины оплетки коаксиала или в конфигурации, где внешний проводник коаксиальной линии на торце оканчивается металлическим фланцем.

Численный анализ структуры поля открытого конца коаксиальной линии при разной толщине внешнего проводника, рассчитанная с помощью метода FDTD [10], показал, что толщину оплетки или размеры фланца необходимо делать не менее двух радиусов центральной жилы коаксиального кабеля [11].

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 ближнеполевой диагностики биологических тканей в силу простоты включения данного элемента в резонатор и возможности реализации глубин зондирования в доли миллиметра, что необходимо, в частности, для диагностики кожи.

Поэтому в качестве зондирующего элемента в разрабатываемых для диагностики мягких тканей 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 ближнеполевой томографии кожи глубины зондирования датчиков не должны превышать толщину кожного покрова, а площадь торца измерительного конденсатора должна быть одинакова. Реализация данных требований позволяет практически исключить негативное влияние эффекта «прижима».

Следует отметить, что биологические ткани являются проводящими средами. Контакт измерительной емкости резонансного датчика с поверхностью таких объектов, как правило, приводит к сильному уменьшению добротности системы и, следовательно, к низкому уровню сигнала в максимуме резонансной кривой. Коррекцию резонансной характеристики системы для конкретной среды с целью уменьшения вносимых в резонатор потерь можно осуществлять при помощи индуктивности, включенной параллельно измерительной емкости.

В качестве резонатора в ближнеполевых датчиках предпочтительнее использовать отрезок коаксиальной линии. Преимущество такой распреде-

лётной системы перед отрезком двухпроводной линии связано с отсутствием электрических полей вне коаксиальных проводников, что исключает влияние диэлектрических объектов в окрестности резонатора на показания измерительной системы. Для удобства использования датчика медицинскому персоналу резонансную систему целесообразно поместить в экранирующий корпус.

На рис. 8 показана фотография датчика для исследования биологических тканей, разработанного с учетом указанных выше условий. Его электродинамическая модель подробно описана в работе [12].



Рис. 8. Фотография резонансного датчика для ближнепольной СВЧ-диагностики биологических тканей. Измерительная часть датчика выполнена в виде краевой емкости цилиндрического конденсатора. Толщина внешней обкладки превосходит радиус центрального проводника

Для демонстрации возможностей метода резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования в дерматологии 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 0,2 мм, который фиксировал среднюю 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 цен-

тральной 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 [13].

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 (рис. 9).

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 (рис. 9).

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, кератома, меланома. В каждой группе заболеваний было пять человек. Глубина зондирования датчика составляла 1,1 мм. По данным гистологического исследования поверхностный рельеф кожи в области пигментных новообразований были идентичны здоровой коже. Кроме этого, средняя на глубине зондирования диэлектрическая проницаемость тканей родинки и здоровой кожи практически не имеют отличий, однако диэлектрическая проницаемость тканей меланомы примерно в 2 раза меньше чем у здоровой кожи, а в случае кератомы — примерно в 1,3 раза [14].

Наряду с изучением кожных патологий нами проводились исследования глубинной структуры здоровой кожи. Было показано, что диэлектрическая проницаемость и проводимость тканей кожи увеличивается по мере удаления от ее поверхности [14].

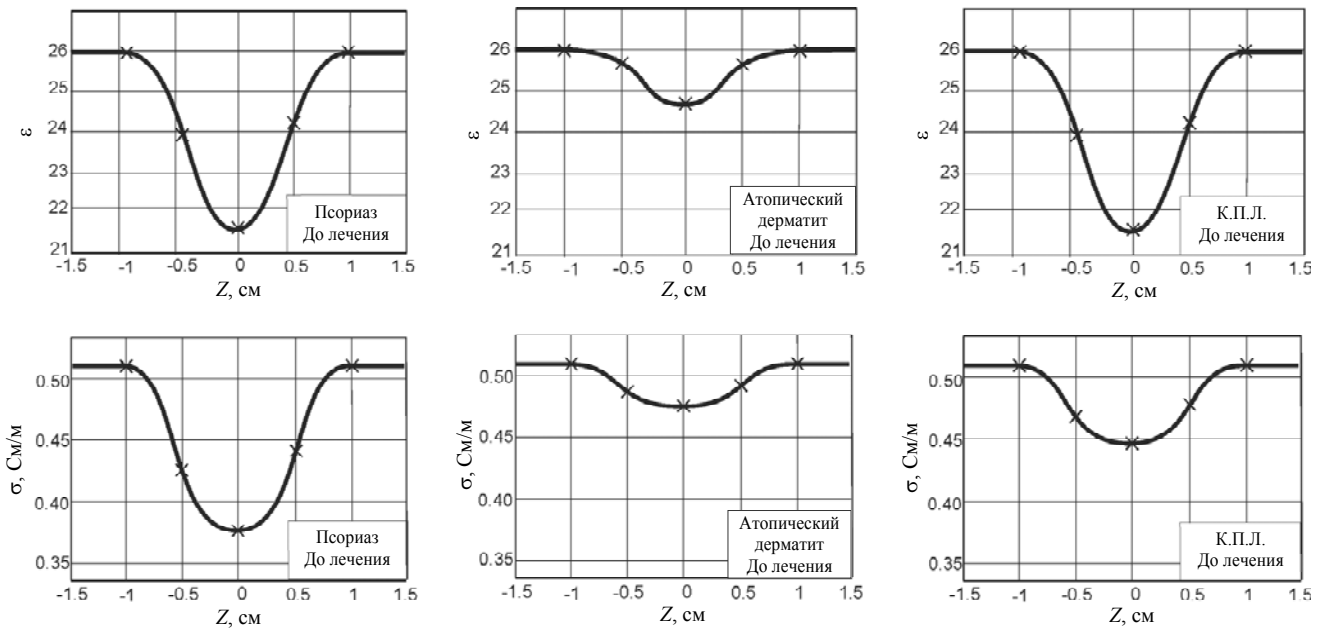


Рис. 9. Диэлектрическая проницаемость ϵ и проводимость σ кожи в области локализованного патологического участка (псориаз, атопический дерматит, красный плоский лишай). Заболевания в стадии обострения. Диаметр очагов 1 см, координата Z отсчитывается относительно центра поражённого участка

С целью демонстрации возможностей метода резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования применительно к оценке жизнеспособности трансплантата как *in vivo* (в живом организме), так и *ex vivo* (вне организма) непосредственно перед трансплантацией проводились измерения во времени электродинамических характеристик паренхимы почек лабораторных животных (кроликов). При этом полностью имитировался процесс мультиорганного забора для трансплантации. Под наркозом, в условиях сохраненного кровотока, проводилось изъятие почек с фрагментами аорты и нижней полой вены. Через аорту и соответствующие артерии выполнялось промывание почек раствором «кустодиола» (консерванта) до полного вымывания крови из органа. Далее одна из почек помещалась в раствор кустодиола комнатной температуры ($+19 \div 20^\circ\text{C}$), другая — при температуре в раствор кустодиола со льдом при температуре $+4^\circ\text{C}$. В ходе эксперимента создавались одинаковые условия для органов, за исключением температуры консервации.

Исходя из приведенных результатов (рис. 10), можно отметить разницу между холодной и тепловой ишемией органов, появляющейся через 20 минут с момента консервации. Сравнение с литературными данными по скорости ишемического повреждения органов показывает возможность применения метода резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования для выявления ранних ишемических повреждений паренхимы органа при трансплантации.

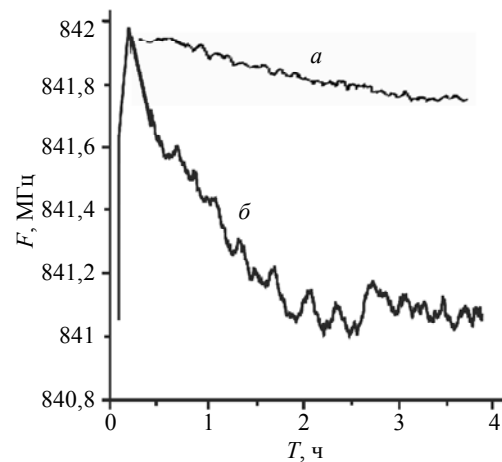


Рис. 10. Изменение резонансной частоты датчика от времени при контакте с паренхимой почки (а) холодная ишемия, (б) тепловая ишемия

Кроме зонда, контактирующего с исследуемой тканью, на базе резонансного датчика нами был изготовлен и опробован зонд, реагирующий на малые добавки, появляющиеся при распаде клетки в консервирующей жидкости, промывающей орган, который подготовлен к трансплантации и находится в критическом состоянии. Через определенные промежутки времени производился забор образца консерванта из органов. Была продемонстрирована связь электродинамических характеристик «кустодиола», изменяющихся в течение эксперимента с накоплением в нем продуктов распада клеток (рис. 11). Таким образом, имея набор калибровочных кривых, можно осуществлять экспресс-диагностику жизнеспособности органа,

подготовленного к трансплантации за несколько секунд. При сравнении измерений электродинамических параметров паренхимы и консервирующей жидкости видно, что появление продуктов распада в кустодиоле несколько “запаздывает”, что согласуется с последними публикациями о результатах маргинальных (трупных) трансплантаций почек [15].

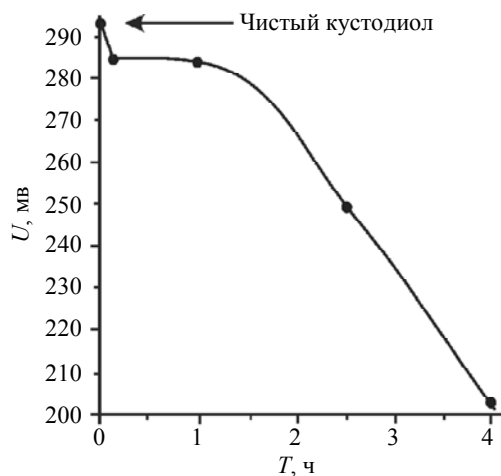


Рис. 11. Изменение амплитуды сигнала датчика на резонансной частоте от времени прокачки.

Исследуемая жидкость — “Кустодиол”. (Тепловая ишемия)

Результаты, полученные с помощью ближнеполюсной СВЧ-диагностики по оценке жизнеспособности трансплантируемого органа, однозначно фиксируют временную динамику распада ткани этого органа. Разработанная измерительная система также чувствительна к физиологическим и патологическим изменениям в биологических тканях, в том числе к опухолевым, а также к незначительному изменению кровотока в тканях, богатых кровеносными сосудами [13, 16—17].

Заключение

В работе описана методика бесконтактной диагностики параметров плазмы атмосферного давления с помощью ближнеполюсного СВЧ-зондирования. На базе резонансного СВЧ-зонда разработана диагностическая система, позволяющая проводить исследования плазмы через диэлектрическую стенку разрядной камеры. Показано, что для плазмы атмосферного давления, ближнеполюсная СВЧ-диагностика позволяет находить мнимую часть комплексной диэлектрической проницаемости плазмы или величину отношения концентрации электронов к электронной частоте столкновений N/ν . С учетом дополнительных измерений

мощности плазмоздающего генератора, вкладываемой в разряд, по результатам ближнеполюсных измерений удастся восстановить значения N и ν . Возможности метода продемонстрированы при изучении временной динамики плотности плазмы и электронной частоты столкновений высокочастотного емкостного разряда в аргоне при атмосферном давлении.

Экспериментально реализован метод подповерхностной ближнеполюсной СВЧ-диагностики сред с пространственно локализованными квазиодномерными неоднородностями. Разработана система резонансных измерительных систем с разными глубинами зондирования для изучения неоднородных структур. Построена упрощенная схема решения обратной задачи для случая квазиодномерных инородных включений с резкими границами. Достигнута 5%-точность определения диэлектрических и геометрических параметров исследуемых объектов.

Продемонстрирована диагностическая и прогностическая ценность метода ближнеполюсного СВЧ-зондирования применительно к медицинским приложениям. Для исследования биологических тканей был изучен эффект «прижима», характеризующийся зависимостью показаний ближнеполюсного измерительного датчика от силы давления его на поверхность биообъекта. Найдены конструктивные решения и разработаны измерительные системы, позволяющие свести к минимуму негативное влияние «прижима» путем использования зондирующего элемента в виде цилиндрического конденсатора, внешняя обкладка которого оканчивается металлическим фланцем. С помощью сконструированных датчиков изучена комплексная диэлектрическая проницаемость тканей кожи при дерматозах и показано, что электродинамические характеристики кожи даже при отсутствии визуальных изменений в области патологии отражают ремиссию заболевания, что использовано для неинвазивной диагностики кожных патологий. Показана возможность оценки состояния органов для трансплантации по значениям электродинамических характеристик тканей трансплантатов и консервирующей их жидкости, что использовано для экспресс-диагностики жизнеспособности органов при трансплантации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-02-97069 p_поволжье_a.

Литература

1. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. — М.: Физматгиз, 1963.
2. Янин Д. В., Костров А. В., Смирнов А. И. и др. // ЖТФ. 2012. Т. 82. № 4. С. 42.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики: Электричество. — М.: Наука, 1983.
4. Yanin D. V., Galka A. G., Kostrov A. V., et al. // *Radio-physics and Quantum Electronics*. 2014. V. 57. No. 1. P. 36.
5. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В. и др. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. — М.: Наука, 1983.
6. Гайкович К. П. // *Нано- и микросистемная техника*. 2007. № 8(85). С. 50.
7. Valerica Raicu, Nobuko Kitagawa, Akihiko Irimajiri // *Phys. Med. Biol.* 2000. V. 45. No. 2. P. L1.
8. Sunaga T., Ikehira H., Furukawa S., et al. // *Phys. Med. Biol.* 2002. V. 47. No. 1. P. N11.
9. Yoshihito Hayashi, Nobuhiro Miura, Naoki Shinyashiki, et al. // *Phys. Med. Biol.* 2005. V. 50, No. 4. P. 21.
10. Taflove A. *Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method*. — Boston-London: Artech House, 1995.
11. Yanin D. V., Galka A. G., Kostrov A. V., et al. / *Proceedings of 23th International Crimean Conference*, 2013. P. 1067.
12. Smirnov A. I., Yanin D. V., Galka A. G., et al. / *Proceedings of International Conference on Antenna Theory and Techniques*, 2013, 16—17 September, Odessa, Ukraine. P. 839.
13. Костров А. В., Стриковский А. В., Янин Д. В. и др. // *Альманах клинической медицины*. 2008. Т. 17 № 2. С. 96.
14. Янин Д. В., Галка А. Г., Смирнов А. И. и др. / *II Всероссийская Микроволновая конференция*. Москва, 26—28 ноября 2014 г. С. 503.
15. Каабак М. М., Сандиков В. А. и др. / *Материалы конференции: Клиническая трансплантация органов*. Москва, 26—27 сентября 2007 г.
16. Васенин С. В., Дружкова И. Н., Костров А. В. и др. // *Медицинский альманах*. 2008. № 5. С. 53.
17. Миронов С. В., Загайнов В. Е., Васенин С. А. и др. // *Современные технологии в медицине*. 2010. Т. 1. № 2. С. 37.

Resonant near-field microwave diagnostics of inhomogeneous mediums

D. V. Yanin¹, A. G. Galka¹, A. I. Smirnov^{1,2}, A. V. Kostrov¹, and A. V. Strikovskii¹

¹Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences
46 Ul'yanov str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia
E-mail: dyanin@appl.sci-nnov.ru; door_s@mail.ru

²Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod
23 Gagarin av., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

Received November 10, 2014

The article is devoted to development and experimental realization of a method of resonant near-field microwave diagnostics of inhomogeneous mediums. At the heart of this diagnostics is underlying the dependence of the impedance of electrically small antenna on electrodynamics parameters of a surrounding medium. If the antenna is connected to the resonance system as a load, the resonance frequency shift and the Q-factor variation can be used to estimate the electromagnetic parameters of the medium in the area of the near-field of antenna. For subsurface diagnostics (tomography) of inhomogeneities it is required to change effective depth of sounding or, in other words, the characteristic scale of localization of a quasi-static electric field in medium. As opposed to wave methods, near-field microwave diagnostics allows to provide the subwavelength resolution. In article the concrete examples of realization of the devices intended for diagnostics of plasma in discharges of atmospheric pressure, contrasting dielectric objects and pathological changes in biological tissues are discussed.

PACS: 87.19.Rf, 52.70.Gw

Keywords: quasistatic electric field, resonance, permittivity, conductivity, diagnostics, plasma, inhomogeneous mediums, biological tissues.

References

1. A. A. Brandt, *Microwave Investigation of Dielectrics* (Fizmatgiz, Moscow, 1963) [in Russian].
2. D. V. Yanin, A. V. Kostrov, A. I. Smirnov, et al., *Tech. Phys.* **82** (4), 42 (2012).
3. D. V. Sivukhin, *General Physics: Electricity* (Nauka, Moscow, 1983) [in Russian].
4. D. V. Yanin, A. G. Galka, A. V. Kostrov, et al., *Radio-physics and Quantum Electronics* **57**, 36 (2014).
5. A. N. Tikhonov, A. V. Goncharky, V. V. Stepanov, et al., *Regularizing Algorithms and a Priori Information* (Nauka, Moscow, 1983) [in Russian].
6. K. P. Gaikovich, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, No. 8(85), 50 (2007).
7. Valerica Raicu, Nobuko Kitagawa, and Akihiko Irimajiri, *Phys. Med. Biol.* **45** (2), L1 (2000).
8. T. Sunaga, H. Ikehira, S. Furukawa, et al., *Phys. Med. Biol.* **47** (1), N11 (2002).
9. Yoshihito Hayashi, Nobuhiro Miura, Naoki Shinyashiki, et al., *Phys. Med. Biol.* **50** (4), 21 (2005).
10. A. Taflove, *Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method*. (Boston-London: Artech House, 1995).
11. D. V. Yanin, A. G. Galka, A. V. Kostrov, et al., in *Proceedings of 23th International Crimean Conference*, (2013), p. 1067.
12. A. I. Smirnov, D. V. Yanin, A. G. Galka, et al., in *Proceedings of International Conference on Antenna Theory and Techniques* (2013, 16—17 September, Odessa, Ukraine), p. 839.
13. A. V. Kostrov, A. V. Strikovskiy, D. V. Yanin, et al., *Almanakh Klinich. Meditsin.* **17** (2), 96 (2008).
14. D. V. Yanin, A. G. Galka, A. I. Smirnov, et al., in *Proc. II All-Russian Microwave Conf.* (Moscow, November 26—28, 2014), pp. 503—508.
15. M. M. Kaabak, V. A. Sandikov, et al., in *Proc. Conf. on Clinical Transplantation* (Moscow, September 26-27, 2007).
16. S. V. Vasenin, I. N. Druzhkova, A. V. Kostrov, et al., *Meditsin. Alman.*, No. 5, 53 (2008).
17. S. V. Mironov, V. E. Zagainov, S. A. Vasenin, et al., *Sovr. Tekhnol. Meditsin.* **1** (2), 37 (2010).