

## **ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗОНАТОРНОГО МИКРОЗОНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В БИООБЪЕКТАХ**

Гордиенко Ю. Е., Старостенко В. В., Полетаев Д. А.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского

61166, Харьков, пр. Ленина, 14, каф. МЭПУ, тел. (057) 702-13-62,

95007, Симферополь, пр. Вернадского, каф. радиофизики и электроники 4,

тел. (0652)608-260, E-mail: dm1try@tnu.in.ua

The basic directions of optimization resonator microprobe for bioobject's microwave scanning microscopy are analysed by means of methods of direct numerical modelling.

In work the obvious kind of function, invariant concerning size of a backlash between an end face of the aperture and the sample is found. Introduction of the given function will allow to minimize the error of measurement.

### **Введение**

Успех применения СВЧ методов диагностики обуславливается бесконтактностью и неразрушаемостью тестируемого образца при проведении исследования [1, 2]. Высокая чувствительность ближнеполевых датчиков к изменению электрофизических параметров образца дает возможность применять их для определения влагосодержания в биообъектах.

Для целей изучения жизнедеятельности организма оказывается важным исследование содержания свободной воды в его тканях и жидкостных средах [3]. Методы исследования данного показателя до настоящего времени недостаточно развиты. В этой

связи большой интерес представляют диэлектрические методы исследования биообъектов с использованием преимуществ сканирующей микроволновой микроскопии.

В области дисперсии воды основной вклад в мнимую часть комплексной диэлектрической проницаемости биообразца вносит свободная вода [3]. Для определения характеристик биообъектов используются следующие электрофизические параметры: относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$ .

Благодаря широкому рабочему частотному диапазону, возможности локальной концентрации поля на участке образца, наибольшее распространение получили четвертьволновые коаксиальные резонаторные измерительные преобразователи (КРИП) [5]. Введение вспомогательной коаксиальной апертуры позволяет увеличить разрешающую способность резонаторного измерительного преобразователя (РИП) в целом и сосредоточить электрическое поле на требуемом участке сканируемого образца.

Существует большое количество работ экспериментального и теоретического характера, посвящённых исследованию применения резонаторных измерительных преобразователей для сканирования биообъектов [3]. Однако, в этих работах не проводилась оптимизация чувствительности датчика для выполнения многопараметрических исследований. В свою очередь, теоретические работы базируются на упрощённых моделях резонаторных преобразователей, позволяющих учитывать только колебательные потери в резонаторной системе. Излучение энергии за пределы образца, активные потери в реальном металле стенок резонатора существенно влияют на информационные параметры (добротность и частоту) РИП.

Современные прямые численные методы позволяют существенно уточнить модель резонаторного измерительного преобразователя с коаксиальной измерительной апертурой (РИП КИА), т.е. учесть геометрию апертуры, расположение, размеры и другие характеристики сканируемого объекта.

Целью работы является выделение и анализ факторов, влияющих на чувствительность РИП КИА, применяемых для определения влагосодержания в биообъектах, проведение теоретической калибровки РИП КИА на основе численной модели, выявление величин, инвариантных к величине зазора между датчиком и исследуемым объектом.

### Результаты и обсуждение

Общий вид РИП КИА приведён на рис. 1.

Для проведения практических измерений важно чтобы электрофизические параметры образца оказывали как можно большее влияние на нагруженную добротность РИП. При этом нагруженную добротность не должна быть меньше 100. Из теории коаксиальных линий передач [4] известно, что минимальный коэффициент затухания в коаксиальной линии достигается при отношении радиусов:  $R_1/R_2 = 0,28$ . Очевидно, максимальная добротность четвертьволнового резонатора будет также достигаться при данном отношении.

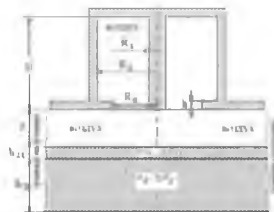


Рис. 1. Модель РИП КИА

Максимум дисперсии для воды приходится на частоту около 10 ГГц [4]. Ввиду этого, рабочая длина волны РИП должна составлять  $\lambda = 3$  см. Одномодовый режим коаксиальной линии сохраняется в диапазоне частот [4]:  $f < c/(\pi(R_1 + R_2))$ , где  $c$  –

скорость света;  $R_1$  – радиус центральной жилы;  $R_2$  – внутренний радиус коаксиального волновода (по рис.1).

Резонансная частота идеального четвертьволнового резонатора находится из выражения:  $f = c(2n-1)/(4H)$ . Исходя из [4] были выбраны следующие геометрические размеры модели:  $H/\lambda = 1,25$ ;  $R_2/\lambda = 0,17$ ;  $h/H = 5,6 \cdot 10^{-3}$ ;  $z = \infty$  (четвертьволновый резонатор нагружен на свободное пространство); проводимость стенок резонатора принята равной  $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$ .

В результате численного решения уравнений Максвелла с учетом потерь на излучение и активных потерь в стенках резонатора, и решения уравнений Гельмгольца (учёт только активных потерь в стенках резонатора) получены зависимости добротности и резонансной частоты РИП от величины коаксиальной апертуры (рис.2).

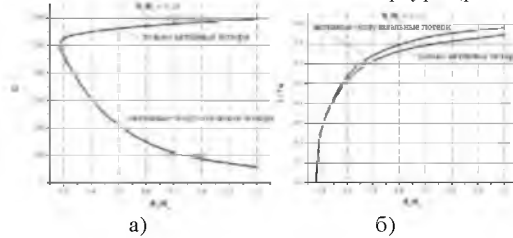


Рис.2. Зависимость а) добротности и б) частоты от величины апертуры

Как видно из графиков, уменьшение размера апертуры минимизирует влияние потерь на излучение в свободное пространство. Необходимость учёта излучательных потерь наиболее явно демонстрируется на зависимости добротности от величины апертуры (рис.2, б). Даже при малом размере апертуры добротности при учёте излучения и без учёта отличаются почти в 2 раза. В то же время, наличие излучения практически не влияют на резонансную частоту.

Руководствуясь физическими соображениями режимов функционирования коаксиальной апертуры, целесообразно исследовать чувствительность резонаторного микрозонда к изменению параметров образца. На рис.3 приведены зависимости добротности и относительного изменения добротности от длины коаксиальной апертуры  $h$ . Графики получены в результате численного решения уравнений Максвелла, для модели с параметрами:  $H/\lambda = 1,25$ ;  $R_2/\lambda = 0,17$ ;  $R_1/R_2 = 0,28$ ;  $z = 0$ ;  $h_{21} = 0$ ;  $h_2/\lambda = 0,14$ ;  $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$ ;  $\epsilon_2 = 3$ ;  $tg \delta_2 = 0,01$ ;  $\lambda = 3$  см. Относительное изменение добротности рассчитывалось исходя из добротности системы при нагрузке на свободное пространство и добротности при нагрузке на образец с параметрами  $\epsilon_2 = 3$ ;  $tg \delta_2 = 0,01$ .

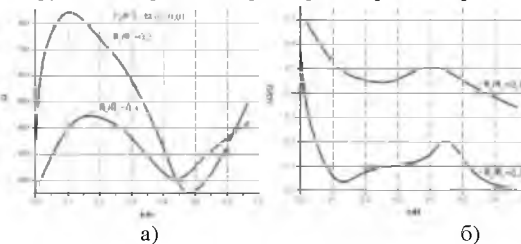


Рис.3. Зависимость а)  $Q$ ; б)  $\Delta Q/Q$  от параметров апертуры

Как видно из графика (рис.3, а) добротность РИП при сканировании образца с параметрами  $\epsilon_2 = 3$ ;  $tg \delta_2 = 0,01$  остаётся довольно высокой даже при раскрытых апертуры  $R_0/R_2 > 0,3$ . Отчётливо виден максимум чувствительности датчика при высоте апертуры  $h/\lambda = 0,5$  (рис.3, б). Данный факт согласуется с физическими предпосылками и свидетельствует об адекватности численной модели. Вместе с тем, из рис.3, б видно, что

даже при оптимальной высоте коаксиальной апертуры  $h/\lambda = 0.5$ , чувствительность РИП в 2 раза меньше, чем при высоте  $h \rightarrow 0$ . Этот факт обусловливается значительным провисанием поля из апертуры. Из графика на рис.3, б следует весьма важный вывод: максимальная чувствительность датчика обеспечивается при высоте апертуры  $h/H < 0.05$ .

Влагосодержание в биообъектах характеризуется диапазоном изменения  $\varepsilon$  от 3 до 10 и  $tg\delta$  от 0,01 до 0.4. Таким образом, численные исследования целесообразно проводить в данном диапазоне изменения электрофизических параметров тестируемого образца.

Расчеты производились для модели с параметрами:  $H/\lambda = 1,25$ ;  $R_2/\lambda = 0,17$ ;  $R_1/R_2 = 0,28$ ;  $z = 0$ ;  $h_2/\lambda = 0,14$ ;  $h/H = 0,01$ ;  $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$ ;  $\lambda = 3$  см.  $R_0/R_2 = 0,29 \dots 1$ .

Воздушный зазор между апертурой и сканируемым образцом изменяет информационные параметры РИП КИА. В результате численного решения уравнений Максвелла для описанной выше геометрии модели, были получены зависимости добротности и частоты РИП от величины зазора  $z$ .

На рис.4 приведена зависимости  $Q$  и  $f$  РИП от величины зазора и параметров образца. Рис.4, а демонстрирует, что добротность в большей мере определяется тангенсом угла относительных диэлектрических потерь, что свидетельствует о большом провисании электромагнитного поля из апертуры, а резонансная частота определяется, в основном, относительной диэлектрической проницаемостью образца.

Графики на рис.4 коррелируют между собой. Это значит, что существует некоторая функция, зависящая от добротности и резонансной частоты, инвариантная относительно величины зазора  $z$ . Эмпирически было найдено следующее выражение:  $N(Q, f) = f^{\frac{1}{\ln(Q)}}$ .

Зависимость данной функции от величины зазора и параметров образца приведена на рис.5.

Сравнивая графики на рис.4, 5, видно, что функция  $N(Q, f)$  практически инвариантна, относительно величины зазора (изменения малы). Значение функции определяется исключительно параметрами образца.

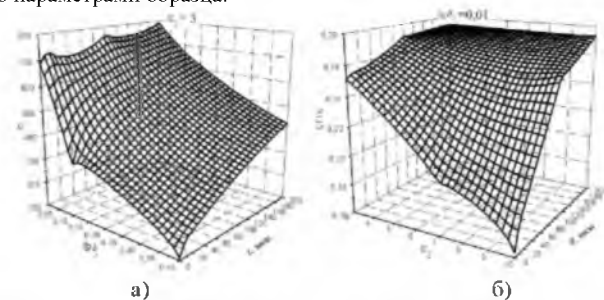


Рис.4. Зависимость а)  $Q$  и б)  $f$  от величины зазора и параметров образца

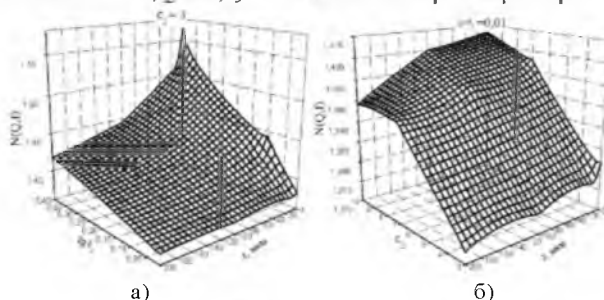


Рис.5. Зависимость функции  $N(Q, f)$  от величины зазора и параметров образца

## **Выводы**

Проведенные исследования свидетельствуют о необходимости учёта излучательных потерь в численных моделях резонаторных измерительных преобразователях с коаксиальной измерительной апертурой.

В работе установлен явный вид функции, инвариантной относительно величины зазора между торцом апертуры и образцом. Введение данной функции позволит минимизировать погрешность измерения, связанную с зазором между образцом и датчиком.

Полученные зависимости информационных параметров РИП КИА позволяют однозначно сопоставить электрофизические параметры биообъектов с их влагосодержанием.

## **Список литературы**

1. Гордиенко Ю. Е., Петров В. В., Хаммуд Ф. М. Оценка численно-аналитических моделей СВЧ резонаторных датчиков с коаксиальной измерительной апертурой // Радиотехника. – 2005. – № 140. – С. 156 – 162.
2. Chen L. F., Ong C. K., Neo C. P. and other. Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization. – Southern Gate: John Wiley & Sons Ltd, 2004. – 537 p.
3. Лисовский В. В. Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. – Мн.: УОБГАТУ, 2005. – 292 с.
4. Кураев А. А., Попкова Т. Л., Сеницын А. К. Электродинамика и распространение радиоволн. – Мн.: Бестпринт, 2004. – 358 с.
5. Гордиенко Ю. Е., Петров В. В., Полетаев Д. А. Свойства четвертьволнового коаксиального СВЧ измерительного преобразователя для диагностики материалов // Радиотехника. – 2008. – № 154. – С. 61 – 66.