

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СВЧ РЕЗОНАТОРНЫХ ДАТЧИКОВ В ПРИБОРАХ ДИАГНОСТИКИ ГИПЕРТОНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ

БОРОДКИНА А.Н., ГОРДИЕНКО Ю.Е.,
СЛИПЧЕНКО Н.И.

Проводится анализ конструкций СВЧ резонаторных датчиков в целях их оптимизации для получения наиболее полной информации о комплексном значении диэлектрической проницаемости в диапазоне частот релаксации свободной воды в биообъектах. Анализ проводится с использованием результатов решения уравнений Максвелла для цилиндрических областей. Определяются возможности совершенствования конструкций датчиков, позволяющие при сохранении точности измерений существенно уменьшить объемы клинических проб.

Введение

Оперативная диагностика кардиологических патологий, выбор путей их лечения и доз препаратов определяют успешность профилактики и лечения этих заболеваний. В настоящее время установлено, что комплексное значение диэлектрической проницаемости проб эритроцитов пациента в области частот релаксации свободной воды содержит информацию, необходимым в лечебной практике этих патологий [1,2].

В настоящее время широко распространены четвертьволновые коаксиальные резонаторные измерительные преобразователи (РИП) [3]. Они обладают возможностью локальной концентрации поля в заданном объеме образца, широким рабочим частотным диапазоном. Использование коаксиальной измерительной апертуры (КИА) малого диаметра позволяет существенно увеличить разрешающую способность этих РИП.

Существует большое количество работ экспериментального и теоретического характера, посвященных применению СВЧ РИП для исследования биообъектов [4]. Современные прямые численные методы позво-

ляют существенно уточнить модель РИП с КИА, учесть геометрию апертуры, положение и размеры образца.

Однако в известных работах не проводилась оптимизация конструкции датчика для проведения измерений нескольких параметров. Кроме того, теоретические работы основаны на упрощенных моделях РИП, которые позволяют учесть только колебательные потери в резонаторной системе. Излучение энергии за пределы образца, которое существенно влияет на информационные параметры (добротность и частоту), в этих моделях исключено из анализа. Проведение теоретической калибровки требует обязательного учета этого фактора. Также важным условием успешного использования КРИП для сканирования биообъектов является инвариантность информационных сигналов к величине зазора между датчиком и образцом и к толщине самого образца.

Таким образом, актуальными являются задачи как совершенствования конструкций РИП с КИА, так и развития их теоретических моделей.

Цель данной работы – определение путей совершенствования конструкций датчиков, обеспечивающих при сохранении точности измерений существенное уменьшение объемов клинических проб и, тем самым, снижение стрессовой нагрузки пациентов.

1. Особенности конструкции РИП

Конструкция РИП в виде четвертьволнового коаксиального резонатора с КИА и помещением исследуемого объекта на открытом торце выбрана с учетом возможности перекрытия диапазона частот $5 \cdot 10^6 \dots 4 \cdot 10^{10}$ Гц, который обеспечивает возможность исследования объектов с разным соотношением свободной и связанной воды.

Предлагаемая конструкция схематически показана на рис. 1.

Минимальный коэффициент затухания в коаксиальной линии достигается при отношении радиусов: $R_1/R_2 = 0,28$. Очевидно, что максимальная добротность четвертьволнового резонатора будет также достигаться при данном соотношении. Воздушный за-

зор под плоскостью апертуры необходим для сохранения образца биоматериала. Сам образец толщиной h_{21} и электрофизическими параметрами $\epsilon_{21}, \text{tg} \delta_{21}$ нанесен на подложку толщиной h_2 и электрофизическими параметрами $\epsilon_2, \text{tg} \delta_2$.

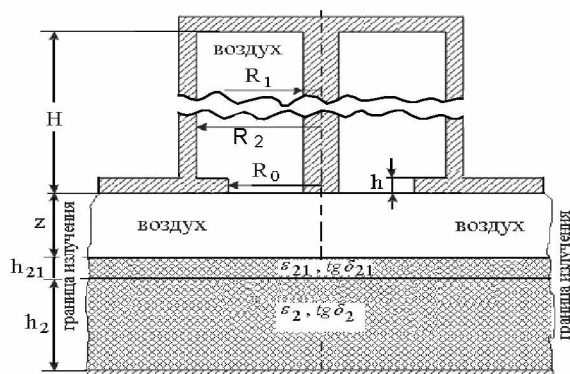


Рис. 1. Электродинамическая структура РИП

2. Определение параметров резонансной камеры РИП

Параметры РИП и системы помещения образца должны обеспечить максимальное его влияние на добротность. При этом нагруженная добротность РИП не должна быть меньше 100.

Провести численный анализ электродинамической структуры (см. рис. 1) можно на основе результатов решения уравнений Максвелла с учетом потерь на излучение. Это позволяет оптимизировать конструкцию РИП и выбрать необходимые соотношения конструктивных параметров [5,6].

Частота максимума дисперсии воды около 10 ГГц. Поэтому рабочая длина волны РИП должна составлять $\lambda = 3$ см. Согласно [7] одномодовый режим коаксиальной линии сохраняется в диапазоне частот:

$$f < \frac{c}{\pi(R_2 - R_1)}, \quad (1)$$

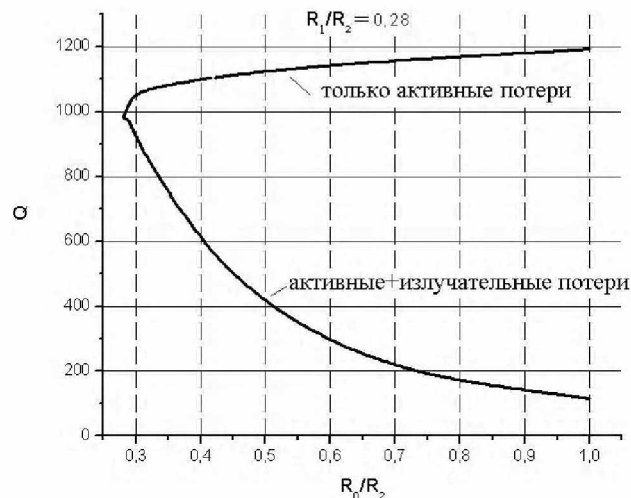
где c – скорость света.

Резонансная частота идеального четвертьволнового резонатора находится из условия:

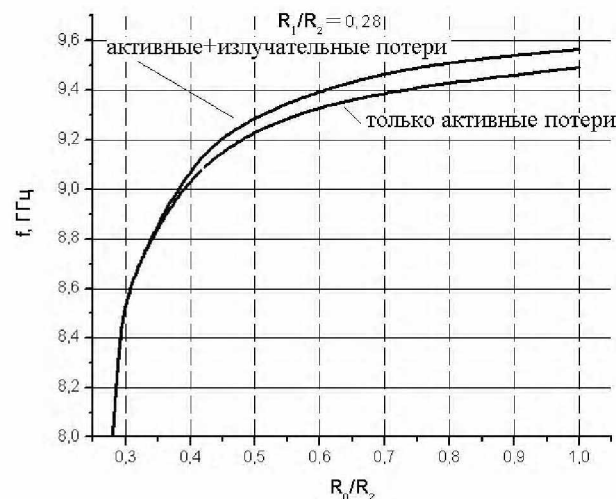
$$f_0 = \frac{c(2n - 1)}{4H}. \quad (2)$$

С учетом предварительной теоретической оценки [7,8] были выбраны следующие геометрические размеры модели (см. рис. 1.): $H/\lambda = 1,25$; $R_2/\lambda = 0,17$; $h/H = 5,6 \cdot 10^{-3}$; $z = \infty$; $h = 0$ (простой четвертьволновой резонатор, нагруженный на свободное пространство). Проводимость стенок резонатора принята равной $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$ Сим/м.

В результате численного решения уравнений Максвелла с учетом потерь в стенках и на излучение и решения уравнений Гельмгольца, учитывающих только потери в стенках, получены следующие зависимости добротности и резонансной частоты РИП от размеров коаксиальной апертуры (рис. 2).



а

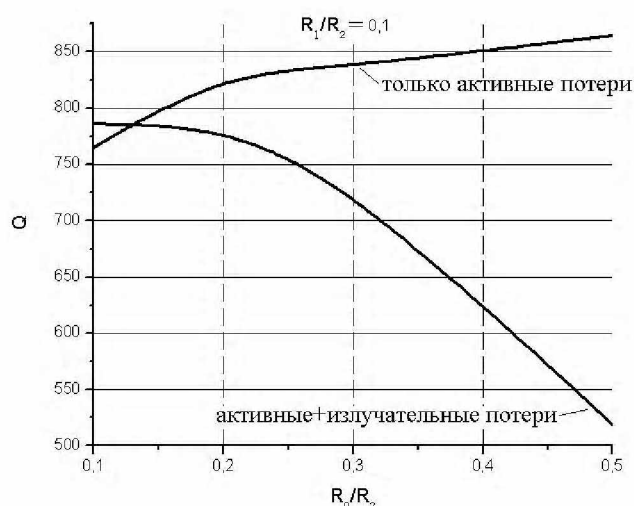


б

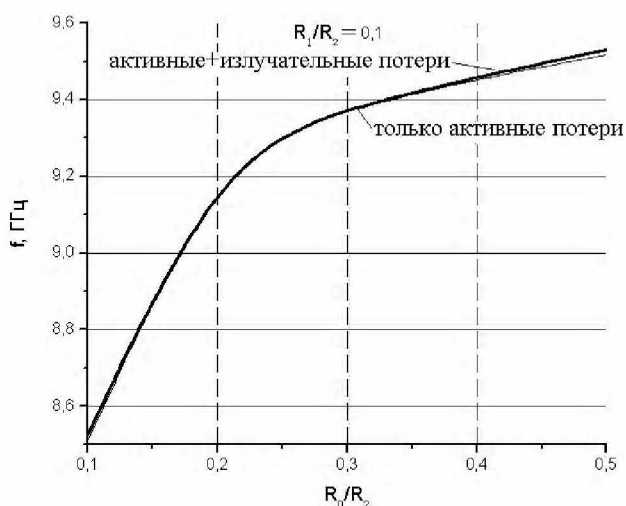
Рис. 2. Зависимость добротности (а), и частоты (б) от размеров апертуры

Необходимость учета потерь на излучение наиболее явно проявляется во влиянии размеров апертуры на величину добротности (см. рис. 2, а). Даже при малых апертурах добротности, вычисленные с учетом потерь на излучение и без него, отличаются почти в 2 раза. В то же время учет излучения почти не влияет на вычисленное значение резонансной частоты (см. рис. 2, б). Как видно из этих графиков, уменьшение размеров апертуры позволяет снизить потери на излучение в свободное пространство.

На рис. 3 показаны результаты аналогичного расчета добротности и резонансной частоты РИП, но при соотношении радиусов коаксиала $R_1/R_2 = 0,1$.



а



б

Рис. 3. Зависимость добротности (а) и частоты (б) от величины апертуры при неоптимальном соотношении радиусов резонансной камеры

Как видно из графика (см. рис. 3 а), отношение R_1/R_2 существенно влияет на добротность РИП, в данном случае она уменьшилась в 1,5 раза. Поведение резонансной частоты РИП (см. рис. 3, б) аналогично приведенному на рис. 2,б.

Уменьшение добротности вынуждено, если РИП предназначен для исследования объектов малых размеров. Выход из этой ситуации может быть в использовании более сложной конструкции РИП, в которой $h \neq 0$ (см. рис.1).

3. Оценка влияния КИА на работу РИП

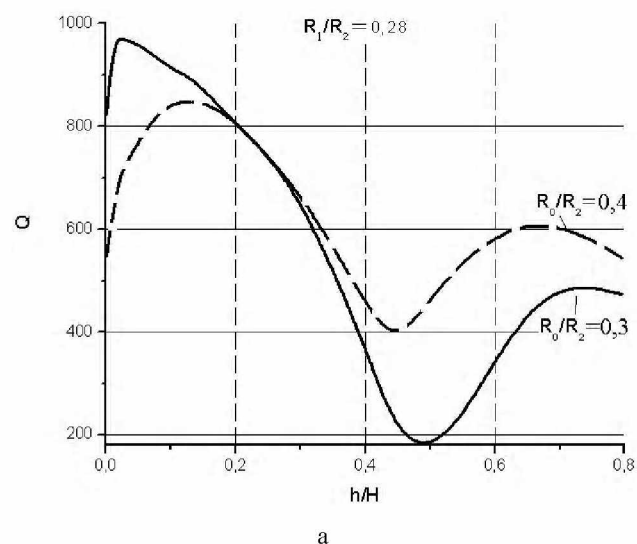
Физические процессы в РИП с КИА более сложные, чем в простом четвертьволновом резонаторе. Данный РИП может функционировать в нескольких режимах:

1. Коаксиальная апертура резонансно настроена на рабочую частоту и создает с основной резонансной камерой систему связанных резонаторов. При исследовании образца изменяется резонансная частота и добротность КИА, что приводит к изменению резонансной частоты и добротности всей системы.

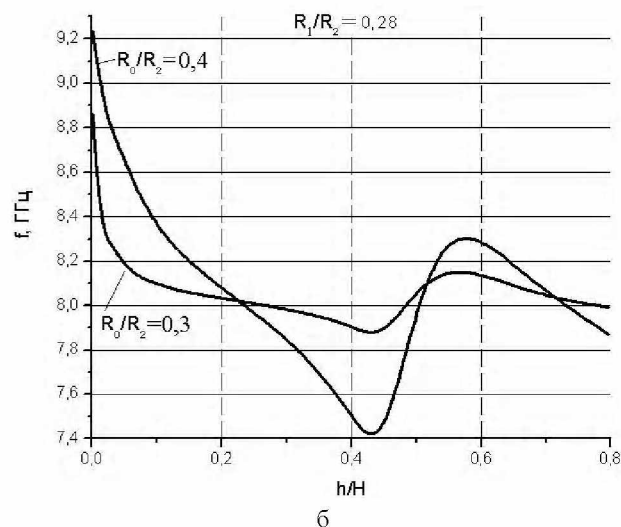
2. Коаксиальная апертура согласована с резонатором в области их соединения, но работает в режиме линии передачи, нагруженной образцом. При сканировании изменяется согласование такой линии с резонатором, что вызывает изменение добротности и резонансной частоты системы.

3. Коаксиальная апертура первоначально согласована как с резонатором, так и с образцом. Несогласованность со стороны образца при сканировании изменяет добротность и резонансную частоту системы.

Реализовать какой-либо из данных режимов в чистом виде весьма проблематично. Режим работы задается выбором геометрии коаксиальной апертуры. Наиболее часто коаксиальная апертура функционирует в нескольких режимах одновременно. На рис. 4 приведены зависимости добротности и резонансной частоты РИП от высоты апертуры h при разных значениях размеров апертур.



а



б

Рис. 4. Зависимость добротности (а) и резонансной частоты (б) от параметров апертур

Изменение добротности (см. рис. 4, а) носит резонансный характер. Более острый резонансный пик наблюдается при меньшей апертуре, что соответствует уменьшению потерь на излучение. Уменьшение резонансной частоты (см. рис. 4, б) обусловлено ростом емкости апертуры при увеличении ее высоты.

Исследуя особенности режимов работы РИП с КИА, учтем физические факторы. При соотношениях $h/\lambda \approx 0,5$ реализуется 1-й режим (рис. 4, а, б). Анализируя графики нужно учесть, что они построены для случая $H/\lambda = 1,25$. Этот режим характеризуется существенным уменьшением добротности, так как соотношение радиусов резонансно настроенной КИА не оптимальное.

Функционирование во втором режиме также предполагает увеличение отношения h/H , которое приводит к вырождению конструкции, сглаживанию ее характеристик. Поэтому использование РИП с КИА при таких конструктивных решениях нецелесообразно. По сути, с увеличением h данный РИП превращается в коаксиальный четвертьволновой резонатор с неоптимальным соотношением радиусов R_1/R_2 .

Очевидно, что наибольшее влияние образца на выходные параметры РИП с КИА будет наблюдаться при малых радиусах апертуры. При этом отношение h/H должно быть в пределах $0,01 \dots 0,05$.

Чувствительность РИП к изменению параметров образца позволяют оценить зависимости добротности и относительного ее изменения от высоты коаксиальной апертуры h [9]. Эти зависимости приведены на рис. 5. Данные графики также получены с помощью численного решения уравнений Максвелла для модели с параметрами: $H/\lambda = 1,25$; $R_2/\lambda = 0,17$; $R_1/R_2 = 0,28$; $z = 0$; $h_{21} = 0$; $h_2/\lambda = 0,14$; $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$; $\varepsilon_2 = 3$; $\text{tg} \delta_2 = 0,01$; $\lambda = 3$ см. Относительное изменение добротности рассчитано исходя из добротности системы, нагруженной на свободное пространство, и добротности, нагруженной на образец с параметрами $\varepsilon_2 = 3$; $\text{tg} \delta_2 = 0,01$.

Как видно из графика (рис. 5, а), добротность РИП при сканировании образца с параметрами $\varepsilon_2 = 3$; $\text{tg} \delta_2 = 0,01$ остается очень высокой даже при раскрывах апертуры $R_0/R_2 > 0,3$. Имеется четко различимый максимум чувствительности датчика при высоте апертуры $h/\lambda \approx 0,5$ (см. рис. 5, б). Здесь также надо учитывать, что $H/\lambda = 1,25$. Данный факт согласуется с физическими условиями и свидетельствует об адекватности численной модели. Вместе с этим, из графиков на рис. 5, б видно, что даже при оптимальной высоте коаксиальной апертуры $h/\lambda \approx 0,5$ чувствительность РИП в 2...2,5 раза меньше, чем при высоте $h \rightarrow 0$. Этот факт обусловлен значительным провисанием поля из апертуры в исследуемый образец. Такое поведение зависимости $\Delta Q/Q$ подтверждает сделанное выше предположение, что наибольшая чувстви-

тельность датчика обеспечивается при малой высоте апертуры — $h/H < 0,05$.

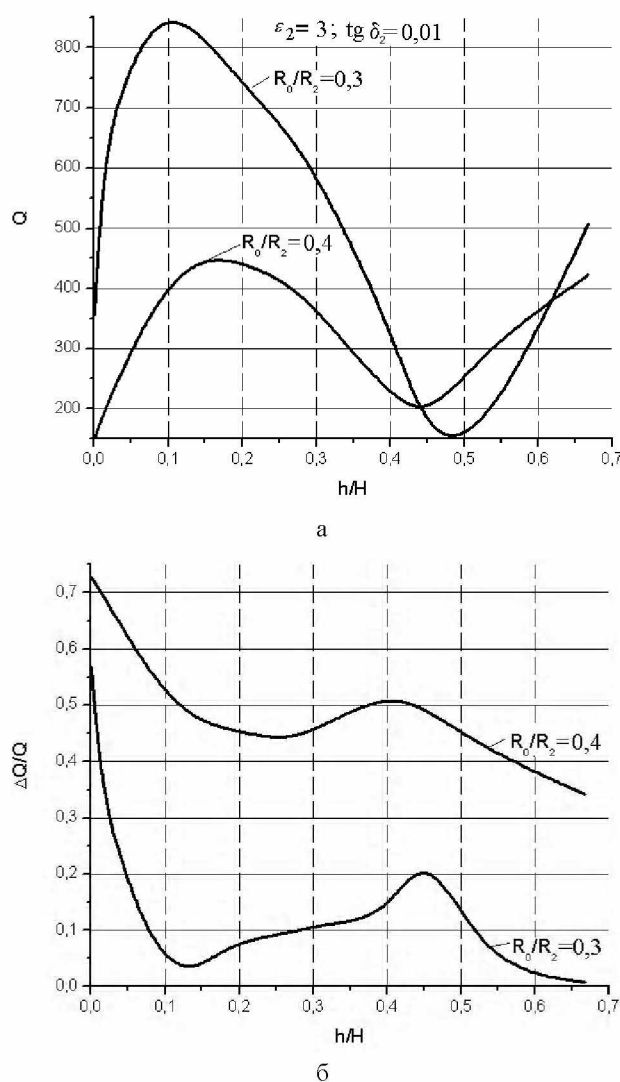


Рис. 5. Зависимость Q (а) и $\Delta Q/Q$ (б) от параметров апертуры

Выводы

Проведенные исследования свидетельствуют о необходимости учета потерь на излучение в численных и аналитических моделях резонаторных измерительных преобразователей с открытой коаксиальной измерительной апертурой. Эти потери являются следствием волновой природы физических процессов в системе резонатор-образец.

Разработанная и реализованная расчетная модель СВЧ резонаторного датчика позволила учесть величину излучения из открытого конца резонаторного датчика. Это является важным фактором, который существенно влияет на результат измерений и который должен учитываться при теоретической калибровке таких датчиков и при определении параметров образца.

Разработанная модель является основой для создания методики оптимизации конструкций РИП с КИА, которая позволит учесть электрофизические характеристики исследуемого объекта и конструкции, где он размещается.

Литература: 1. *Введение в биомембранологию* / Под ред. А.А. Болдырева. М.: Изд-во МГУ, 1990. 208с. **2.** *Стрюк Р.И.* Адренореактивность и сердечно-сосудистая система / Стрюк Р.И., Длусская И.Г. // М.: Медицина. 2003. 160с. **3.** *Steinhauer D. E.* Quantitative imaging of sheet resistance with a scanning near-field microwave microscope. / Steinhauer D. E., Vlahacos C. P., Dutta S. K., Feenstra B. J., Wellstood F. C., Anlage S. M. // Appl. Phys. Lett. 1998. № 72. P. 861 – 863. **4.** *Щеголева Т.Ю.* Исследование биологических объектов в миллиметровом диапазоне радиоволн / Т.Ю. Щеголева // К.: Наук. думка. 1996. 182 с. **5.** *Гордиенко Ю. Е.* Свойства четвертьволнового коаксиального СВЧ измерительного преобразователя для диагностики материалов / Гордиенко Ю. Е., Петров В. В., Полетаев Д. А. // Радиотехника. 2008. № 154. С. 61 – 66. **6.** *Гордиенко Ю.Е.* Вклад колебательных и излучательных потерь в характеристики СВЧ преобразователей с коаксиальной измерительной апертурой. / Гордиенко Ю.Е., Гуд Ю.И., Полетаев Д.А. // Радиотехника. 2009. № 157. С. 108 – 114. **7.** *Кураев А. А.* Электродинамика и распространение радиоволн. / Кураев А. А., Попкова Т. Л., Сеницын А. К. // Мн.: Бестпринт, 2004. 358 с. **8.** *Лебедев И. В.* Техника и приборы СВЧ / Лебедев И. В. // М.: Высш. школа, 1970. 440 с. **9.** *Бондаренко И.Н.* Формирование сигналов сканирования в микроволновой микроскопии с резонаторным микрозондом / Бондаренко И.Н., Гордиенко Ю.Е., Ларкин С.Ю. // Радиотехника. 2009. № 158. С. 59 – 67.

Поступила в редколлегию 14.09.2013

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Лучанинов А.И.

Бородкина Анна Николаевна, аспирант каф. микроэлектронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: биофизика, радиофизика, СВЧ методы измерений, неразрушающий контроль. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (057) 7021-362.

Гордиенко Юрий Емельянович, д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник каф. микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ диагностика материалов и объектов, микроэлектронные датчики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

Слипченко Николай Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф. каф. Микроэлектроники, электронных приборов и устройств, проректор по научной работе ХНУРЭ. Научные интересы: Солнечная энергетика, микроволновая микроскопия материалов и сред. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.