

Ю. А. БАЛОШИН, А. А. СОРОКИН, А. Н. ВОЛЧЕНКО

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЧ-БЛИЖНЕПОЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрена электродинамическая модель ВЧ-ближнепольного зондирования физических объектов (на примере органических и неорганических растворов веществ в дистиллированной воде). Показано, что с поверхности физического объекта можно получать информацию о самом объекте и процессах, происходящих в нем. Информационный сигнал определяется, прежде всего, диэлектрической проницаемостью физического объекта.

Ключевые слова: электродинамическая модель, ВЧ-ближнепольное зондирование, диэлектрическая проницаемость, информационный сигнал.

Диагностика внутреннего состояния различных физических объектов актуальна для микроэлектроники, материаловедения, дефектоскопии, прикладной химии. Одним из наиболее успешных и перспективных методов такой диагностики может стать ВЧ-ближнепольное зондирование.

Однако для более глубокого понимания метода и развития его возможностей в прикладных исследованиях необходимо построение относительно простой электродинамической модели, позволяющей качественно и количественно оценивать отклик ВЧ-ближнепольной измерительной системы при взаимодействии ее с исследуемым физическим объектом. По отклику можно судить о внутренней структуре этого объекта и ее изменениях под воздействием различных внешних факторов. Для этого обратимся к результатам экспериментальных исследований различных растворов веществ (органических и неорганических в дистиллированной воде), полученных нами с помощью измерительного комплекса и реализуемого в нем метода ВЧ-ближнепольного зондирования, которые подробно рассмотрены в работе [1].

Эксперимент № 1. Объект исследования — стеклянные ампулы, заполненные одинаковыми по объему различными растворами веществ в дистиллированной воде (табл. 1).

Таблица 1

Номер ампулы	Исследуемый объект
1	Пустая ампула
2	Дистиллированная вода
3	Раствор NaCl 5 %
4	Раствор NaCl 1 %
17	Гексан
18	Толуол
19	Ацетон
20	Изопропиловый спирт (ИПС)
21	NaCl
22	N ₂ SO ₄
23	CuSO ₄
24	H ₂ SO ₄
25	Дистиллированная вода
26	Этилацетат
27	Бутанол
28	Бензиловый спирт
29	Диоксан + H ₂ O (0,8/0,2)
30	Диоксан + H ₂ O (0,415/0,585)

Цель исследований — определение путем ВЧ-ближнепольного зондирования уровня информационного сигнала, получаемого от раствора в каждой ампуле, относительно выбранной нормы (опорная ампула № 25, заполненная дистиллированной водой). За уровень информационного сигнала примем относительную частоту ВЧ-генератора. Результаты исследований приведены на рис. 1, с его помощью можно сделать следующие выводы:

— уровни сигналов органических (область „n“) и неорганических (область „m“) растворов противоположны по отношению к уровню ω_0 , полученному от дистиллированной воды. Другими словами, возможно, используя ВЧ-ближнепольное зондирование, различать растворы различной природы;

— уровни сигналов определяются концентрацией растворенного вещества на единицу объема растворителя (см. рис. 1 — сигналы от ампул № 3 и 4, 29 и 30).

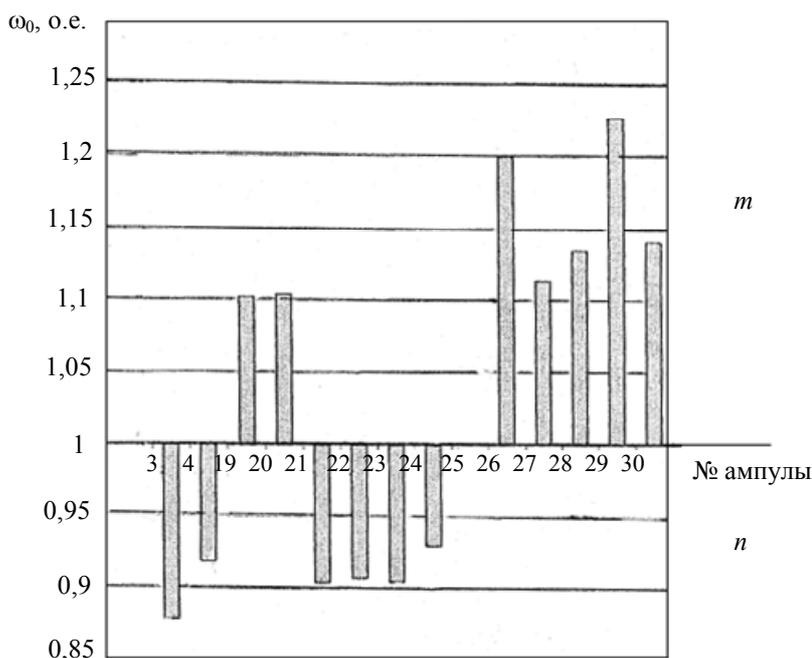


Рис. 1

Эксперимент № 2 является своеобразным продолжением предыдущего исследования. Объект исследования — стеклянные ампулы с органическими жидкостями, представленные Государственным институтом прикладной химии (ГИПХ), причем, по согласованию с сотрудниками ГИПХ, содержание ампул было неизвестным.

Каждая ампула содержала органическое вещество в одинаковой концентрации на единицу объема растворителя (воды), были известны значения диэлектрической проницаемости вещества ϵ_B (табл. 2).

Таблица 2

Номер ампулы	ϵ_B (по ГОСТ)
1	37,00—40,00 (использовалось значение 37,00)
2	54,95
3	53,33
4	51,02
5	56,17
6	58,16
7	58,88
8	58,68

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 2. Цель исследования — установить связь уровня информационного сигнала (цифры со штрихом) со значениями ϵ_B

органических веществ (цифры) при ВЧ-ближнепольном зондировании их растворов. Как видно из рисунка, наблюдается корреляция значений ε и нормированных значений показаний прибора, а именно: с увеличением значения ε повышается уровень относительной частоты прибора.

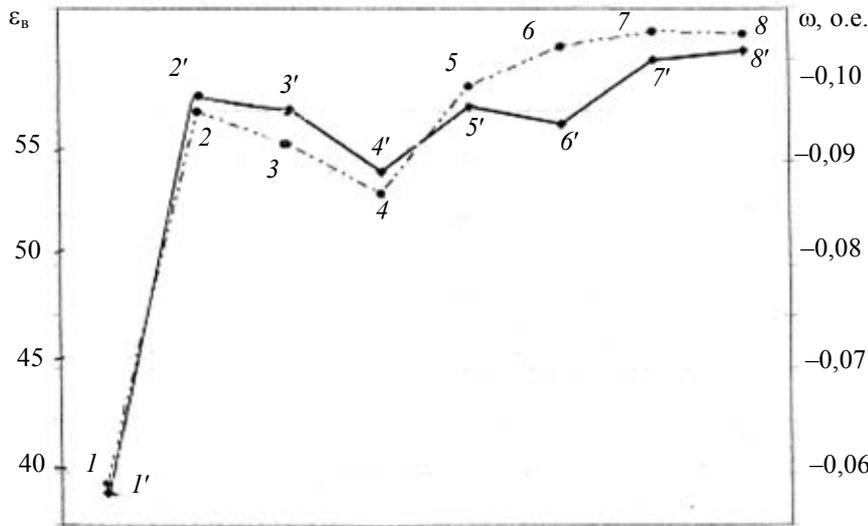


Рис. 2

Электродинамическая модель ВЧ-ближнепольного зондирования. Электродинамическую задачу ВЧ-ближнепольного зондирования будем анализировать исходя из схемы, приведенной на рис. 3.

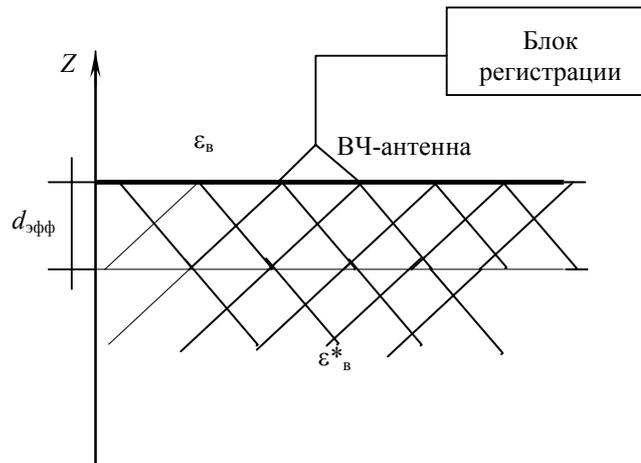


Рис. 3

ВЧ-антенна расположена в однородном верхнем полупространстве ($Z > 0$) с действительным значением диэлектрической проницаемости ε . Нижним полупространством ($Z < 0$), которое характеризуется комплексной диэлектрической проницаемостью вещества $\varepsilon_{\text{в}}^* = \varepsilon_{\text{в}} - i\varepsilon_{\text{в}}^{**}$ будем считать исследуемый физический объект (раствор в ампуле). Такая среда будет поглощать энергию электромагнитного поля ВЧ-антенны. Это поглощение описывается законом Бугера [2]

$$I_Z = I_0 \exp(-\alpha Z), \quad (1)$$

где $\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} \varepsilon_{\text{в}}^{**}$ — коэффициент поглощения электромагнитного поля веществом на единицу длины. При оценке коэффициента α и глубины проникновения электромагнитного поля ВЧ-антенны в вещество для нашей модели наиболее важным является определение природы этого поглощения — является оно резонансным или нерезонансным.

Нерезонансное поглощение определяется потерями энергии электромагнитного поля при его взаимодействии со свободными зарядами в веществе, концентрация которых определяет проводимость последнего σ_B . Для этого случая ε_B^{**} , а значит и α , определяются как

$$\varepsilon_B^{**} = \frac{\sigma_B}{\omega \varepsilon_B}, \quad \alpha = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\sigma_B}{\omega \varepsilon_B}. \quad (2)$$

Резонансное поглощение характеризуется энергетическими потерями поля при взаимодействии его со связанными зарядами в веществе (дипольными моментами атомов и молекул). В этом случае ε_B и ε_B^{**} определяются через дисперсионные соотношения Крамерса-Кронинга [2] как $\varepsilon(\omega)$ и $\varepsilon_B^{**}(\omega)$.

Обратимся теперь к параметрам ВЧ-антенны из работы [1]. Излучение антенны в воздухе (при отстройке) происходит на частоте $f = 4 \cdot 10^6$ Гц, что соответствует длине волны $\lambda = 75$ м. Отношение диаметра антенны $D = 25$ мм к длине волны получается менее 0,0001. Для таких параметров антенны резонансное поглощение в воде и водных растворах можно не учитывать.

Что касается нерезонансного поглощения, то этот процесс характеризуется эффективной глубиной проникновения $d_{эфф}$ (рис. 3) электромагнитного поля в вещество, которую можно определить из формулы (1) как:

$$\alpha Z \rightarrow \alpha d_{эфф} = 1 \rightarrow d_{эфф} = \frac{1}{\alpha}. \quad (3)$$

Ниже приведены значения α дистиллированной воды 9 %-ного раствора NaCl для электромагнитного поля с частотой, равной единицам мегагерц (соизмеримой с частотой ВЧ-антенны), взятые из работы [3], и значения $d_{эфф}$ (данные по σ_{H_2O} и σ_{NaCl} из работы [3] — усредненные).

$$\sigma_{H_2O} = (10^{-4} — 10^{-5}) \text{См} \cdot \text{м}^{-1} \rightarrow \alpha = 4,7 \cdot 10^{-2} \text{м}^{-1} \rightarrow d_{эфф} = 2,1 \cdot 10^2 \text{ м.}$$

$$\sigma_{NaCl} = (2,6 — 3,3) \text{См} \cdot \text{м}^{-1} \rightarrow \alpha = 1,41 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1} \rightarrow d_{эфф} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Как видно из этих соотношений, значения глубины проникновения электромагнитного поля в растворы (кроме дистиллированной воды) позволяют рассматривать ВЧ-зондирование как поверхностное, в отличие от метода СВЧ-зондирования с частотой электромагнитного поля в сотни мегагерц, при котором проникновение поля в вещество может достигать единиц-десятков сантиметров [4].

Таким образом, в нашей задаче физический объект (растворы) рассматривается как вещество с характерным значением $d_{эфф}$, обладающее диэлектрической проницаемостью ε_B и проводимостью σ_B , определяющими особенности процесса нерезонансного поглощения в этом веществе. Такую модель можно использовать не только для растворов. Это обстоятельство и определяет основную специфику рассматриваемой электродинамической модели, а именно: поглощающая среда в ближней зоне ВЧ-антенны существенно влияет на квазистационарную компоненту поля этой антенны и, как следствие — приводит к изменению комплексного сопротивления (импеданса) ВЧ-антенны, а значит и частоты ВЧ-генератора, частью колебательной системы которого она является. В результате этого влияния формируется информационный сигнал, соответствующий изменению частоты $\delta\omega$ генератора в область „*m*“ или „*n*“ (см. рис. 1) относительно уровня опорной частоты, полученной от ампулы с дистиллированной водой $\omega_0 = 2\pi f_0$. Для веществ, которые являются диамагнетиками либо парамагнетиками (к ним можно отнести исследуемые растворы), $\delta\omega$ генератора будет определяться через соотношение:

$$\delta\omega = \frac{\delta C}{C_{\text{эфф}}} \omega_0, \quad (4)$$

где δC — изменение емкостной составляющей импеданса антенны, $C_{\text{эфф}}$ — эффективная емкость ВЧ-антенны, которая отлична от емкости этой антенны в воздухе C_0 [4]:

$$C_{\text{эфф}} = \frac{\epsilon_B D^2}{d_{\text{эфф}}}. \quad (5)$$

Все вышеизложенное позволяет качественно объяснить результаты исследования физических объектов с помощью метода ВЧ-ближнепольного зондирования.

На рис. 1 для области сигналов „*m*“ (неорганические растворы) в предположении, что $\delta\omega = (\omega_m - \omega_0) > 0$, получим, воспользовавшись формулой (4):

$$\delta\omega = \omega_0 \frac{C_m - C_0}{C_0} > 0 \quad (6)$$

С помощью формул (2), (3) и (5) выражение (6) можно преобразовать в неравенство, определяющее уровни сигналов от неорганических растворов.

$$\epsilon_m \sigma_m > \epsilon'_0 \sigma_0, \quad (7)$$

где ϵ_m и σ_m — соответственно диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость исследуемого вещества, а ϵ'_0 и σ_0 — дистиллированной воды.

Для области „*n*“ аналогичным образом получим неравенство для органических растворов:

$$\epsilon_n \sigma_n < \epsilon'_0 \sigma_0. \quad (8)$$

Оценим условия (7) и (8) на примере конкретных растворов. Раствор NaCl (ампулы № 3 и 4)

$$\epsilon_{\text{NaCl}} = \epsilon_m = 5,9; \quad \sigma_m = 3 \text{ С}\cdot\text{мм}^{-1},$$

$$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \epsilon'_0 = 75,9; \quad \sigma_0 = 10^{-4} \text{—} 10^{-5} \text{ С}\cdot\text{мм}^{-1}.$$

Очевидно, что эти данные обеспечивают выполнение неравенства (7), которое определяет условие формирования отношения уровня сигнала ВЧ-антенны от неорганических растворов к уровню дистиллированной воды.

Если обратиться к органическим растворам, то в качестве примера была рассмотрена ампула №19 с раствором ацетона:

$$\epsilon_a = \epsilon_n = 20,74; \quad \sigma_n = 10^{-9} \text{ С}\cdot\text{мм}^{-1},$$

$$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \epsilon'_0 = 75,9; \quad \sigma_0 = 10^{-4} \text{—} 10^{-5} \text{ С}\cdot\text{мм}^{-1}.$$

Эти значения подтверждают справедливость условия (8) при формировании уровней сигналов от органических растворов.

Заключение. Рассмотренная на примере водных растворов количественная электродинамическая модель ВЧ-ближнепольного зондирования подтверждает гипотезу о том, что достоверную информацию о веществе и процессах, происходящих в нем под воздействием различных факторов, можно получить с поверхности вещества, основываясь на уровне информационного сигнала, который связан со значениями диэлектрической проницаемости и проводимости этого вещества и их изменениями при наличии внешнего воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балошин Ю. А. и др. Метод диагностики функциональной активности тканей и органов биообъектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 3. С. 37—43.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 865 с.
3. Самойлов В. О. Медицинская биофизика. СПб: Спец. лит., 2007. 560 с.
4. Кинг Р. Антенны в материальных средах. М.: Мир, 1984. 824 с.

Сведения об авторах

- Юрий Александрович Балошин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики
- Анатолий Александрович Сорокин** — канд. техн. наук, доцент; Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра радиоэлектронных систем управления, Санкт-Петербург;
E-mail: an_sor@mail.ru
- Александр Николаевич Волченко** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики;
E-mail: wolf2684@mail.ru

Рекомендована кафедрой
физики

Поступила в редакцию
22.06.11 г.