

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДЕИОНИЗОВАННОЙ ВОДЕ В КИЛОГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Скавыш Ю.О., Лещинская А.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Петрович В.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

В работе представлены результаты исследования релаксационных процессов в деионизованной воде. Зарегистрировано максимальное значение тангенса угла диэлектрических потерь на определенной частоте и произведено сравнение с другими ранее проведенными исследованиями в этой области.

При производстве полупроводниковых приборов и ИМС широко используются различные технологические операции, связанные с использованием деионизованной воды (ДВ), а также растворов на ее основе. В связи с этим, а так же в связи с разработкой новых технологических операций в области микро- и нанoeлектроники, становится весьма актуальной задача не только получения сверхчистой воды и изучения ее свойств, но и их изменение при внесении в воду различных примесей.

Применительно к любой среде (твердое тело, жидкость, газ) $\text{tg}\delta$ – это отношение двух энергий: в числителе - активная энергия (мощность), в знаменателе - реактивная энергия (мощность). В работе [1] моего руководителя было показано, что этот параметр является наиболее чувствительным к структуре и свойствам различных сред. Более того, численные значения $\text{tg}\delta$ не зависят от геометрических размеров и конструкции датчика, находящегося, например, в ДВ.

В публикации [2] было показано, что для гомологического ряда H -спиртов в диапазоне частот не свыше 1 МГц зависимость $\text{tg}\delta$ имеет экстремум. Авторы этой работы справедливо отмечают, что в этом же районе частот значение диэлектрической проницаемости спиртов уменьшается.

С нашей точки зрения, структурная формула молекул воды может быть записана так же, как и для любого из спиртов (R-OH для спиртов и H-OH для воды). По этой причине мы ожидали и обнаружили, что ДВ так же, как и спирты, в упомянутом диапазоне частот обладает ярко-выраженной экстремальной зависимостью $\text{tg}\delta$ от частоты f (рисунок 1).

На рисунке 1 представлена зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты f для ДВ при $\text{pH}=6,7$ (производство ОАО «Интеграл» г. Минск).

Для регистрации $\text{tg}\delta$ был использован регистратор иммитанса Е7-25 (производство ОАО «МНИПИ» г. Минска). В качестве датчика мы использовали два металлических электрода изолированных от непосредственного контакта с ДВ слоем высококачественного диэлектрика. Частным случаем таких датчиков могут быть медные спирали или штыри, изготовленные на основе провода марки ПЭВ-2. Металлические части этого изолированы от прямого контакта с водой слоем эмали – винифлекс (или поливинилацеталь). Лак был нанесен заводом производителем моточных проводов. По этой причине, использованные нами датчики, давали возможность наблюдать только за объемными свойствами воды. Свойства же слоев воды, находящихся в слое Гуи-Гельмгольца (некий аналог областей ОПЗ в p - n -переходах) таким датчиком не контролируются.

Значение $\text{tg}\delta$, в соответствии с рисунком 1, в максимуме равно 0,4 единицы при частоте около 20 кГц. На «низких» частотах (ниже 100 Гц) значение $\text{tg}\delta$ порядка 0,02 и может быть принято за 0 по отношению к его максимальному значению. При частотах свыше 1 МГц ситуация аналогична: значение $\text{tg}\delta$ стремится к 0.

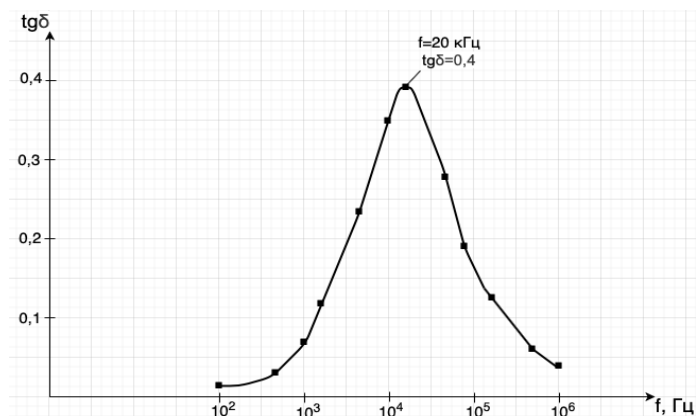
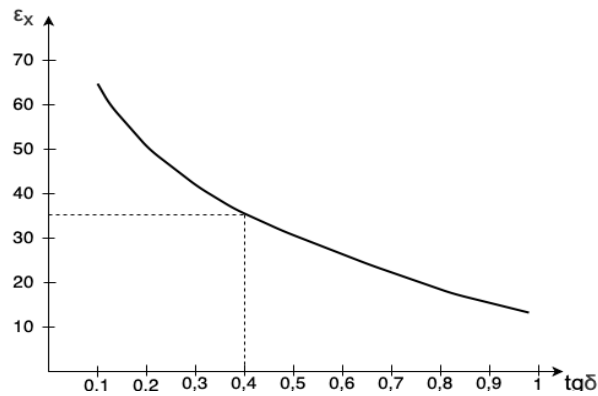


Рисунок 1 – Экспериментальная зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты

Рисунок 2 – Теоретическая зависимость ϵ_x от $\text{tg}\delta$

В соответствии с моделью релаксационных потерь (моделью Дебая) такое поведение $\text{tg}\delta$ описывается уравнением (1):

$$\text{tg}\delta = \frac{\omega\tau(\epsilon_c - \epsilon_x)}{\epsilon_c + \epsilon_x(\omega\tau)^2} \quad (1)$$

Максимальное значение $\text{tg}\delta$ определяется условием (2):

$$\omega\tau = \sqrt{\frac{\epsilon_c}{\epsilon_x}} \quad (2)$$

В этих уравнениях $\omega=2\pi f$, где f -частота измерений в Гц, τ – время релаксации наблюдаемого процесса, ϵ_c – стационарное значение диэлектрической проницаемости (для воды 80 ± 2 единиц), ϵ_x – диэлектрическая проницаемость при частоте намного большей, чем частота, отвечающая максимальному значению $\text{tg}\delta$.

Решая систему уравнений (1) и (2), мы получили соотношение (3):

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_x} = (1 + 2\text{tg}^2\delta) - 2\text{tg}\delta \sqrt{1 + \text{tg}^2\delta} \quad (3)$$

Графический вид соотношения (3) представлен на рисунке 2. Эта зависимость позволяет по значениям $\text{tg}\delta$ в максимуме определить значение диэлектрической проницаемости ϵ_x до которой уменьшается ϵ_c на «высоких» частотах.

Совместный анализ рисунка 1 и 2 позволяет сделать следующее заключение: на частотах в районе 20 кГц диэлектрическая проницаемость ДВ уменьшается до значений 35 единиц на частотах 10^6 Гц и выше. Этот результат имеет существенную новизну: до сих пор считалось, что до частот около 10^9 Гц значение диэлектрической проницаемости ДВ не меняется и составляет около 80 единиц.

Единичным структурным элементом воды является диполь H_2O , поэтому находясь в относительно свободном состоянии (в жидкой фазе), вода неизбежно подвержена структурной самоорганизации [3,4]. При этом в воде формируются нанокластеры различной структуры. Проявление одной из форм этих кластеров мы и наблюдаем на дисперсии $\text{tg}\delta$ (f). Выяснением, какова при этом структура конкретного нанокластера мы сейчас занимаемся.

Можно отметить только следующее: численное значение частоты, на которой наблюдается максимальное значение $\text{tg}\delta$, позволяет определить энергию активации соответствующего релаксационного процесса по методике, предложенной в работе [5]. Для нашего случая, частоте 20 кГц, соответствующей максимуму $\text{tg}\delta$, соответствует энергия активации $E_a=0,46$ эВ. Это весьма значительная энергия связи, хотя в целом она полностью соответствует (по порядку величины) известному значению водородных связей.

Выводы:

- особые свойства ДВ могут быть использованы как диагностический инструмент при разработке и контроле технологических процессов не только в микро- и нанoeлектронике, но и в биомедицине.

- релаксационный процесс для ДВ в килогерцовой области свидетельствует, с точки зрения физики протекающих в ДВ процессов ее самоорганизации, о структурной неоднородности воды, как единого целого.

- на основе полученных значений $\text{tg}\delta$ и соответствующих этим значениям частот можно определить энергию активации (связи) молекул воды.

Список использованных источников:

1. S. A. Volchek, V. A. Petrovich, S. V. Granko, V. Yu. Serenkov and V.A. Yakovtseva Bond Energy in Nanostructured Water — World scientific publishing company, 2019
2. ФКС XIII: Материалы конференции — Гродно: ГрГУ, 2015, стр 29
3. Цивадзе А.Ю. (ред.) Структурная самоорганизация в растворах и на границе раздела фаз. Монография. - Москва, ЛКИ, 2008. - 544 с.
4. Клеман М. Основы физики частично упорядоченных сред / М.Клеман, О. Д. Лаврентович; пер. с англ. под ред. С. А. Пикина, В.Е. Дмитриенко. - М: Физматлит, 2007
5. Журнал №3 «Нанотехнологии: разработка, применение XXI век» — Москва, 2019.стр 5-13