

продукции с низким энергопотреблением, при этом требования, предъявляемые к потребляемой энергии не должны оказывать влияния на функциональность оборудования. Требования к энергопотреблению оборудования постоянно

ужесточаются, что создает необходимость своевременного пересмотра соответствующих стандартов и установления новых норм энергопотребления оборудования с целью обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции.

УДК 621

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИММИТАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕИОНИЗОВАННОЙ ВОДЫ Волчѣк С.А.¹, Завацкий С.А.¹, Петрович В.А.¹, Серенков В.Ю.¹, Петлицкий А.Н.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

²"Белмикрoанализ" филиала НТЦ "Белмикросистемы" ОАО "ИНТЕГРАЛ"-управляющая компания холдинга "ИНТЕГРАЛ", Минск, Республика Беларусь

При производстве полупроводниковых приборов и ИМС широко используются различные технологические операции, связанные с использованием чистой воды (деионизованной), а также растворов на ее основе. В связи с этим, а также в связи с разработкой новых технологических операций в области микро- и нанoeлектроники, становится весьма актуальной задача – получение сверхчистых материалов, а также контроля свойств сверхчистых жидкостей и жидкостей, использованных в технологических операциях.

В настоящей работе приводятся результаты наблюдения одного из важнейших параметров воды – тангенса угла потерь ($\text{tg}\delta$). В самом общем случае применительно к любой изучаемой среде, тангенс угла потерь с точки зрения физики протекающих в объектах явлений, представляет собой соотношение двух энергий (или мощностей): в числителе должна стоять активная энергия, а в знаменателе – реактивная. Добротность этого же объекта – величина, обратная $\text{tg}\delta$. Характерно также, что $\text{tg}\delta$ (добротность) описывает адекватно любой объект: проводник, полупроводник, диэлектрик, магнитный материал, колебательный контур, оптический резонатор и т. п. В более узком смысле тангенс угла потерь для диэлектрика как частный случай – это соотношение мнимой и действительной частей комплексной диэлектрической проницаемости; для магнитного материала – соотношение мнимой и действительной частей комплексной магнитной проницаемости и т. д.

Вода, даже сверхчистая (например фармацевическая) по известным физическим причинам диссоциирует с константой диссоциации при нормальных условиях 10^{-7} . При этом сформированные ионы водорода (H^+) и ионы гидроксида (OH^-) на фоне недиссоциировавших молекул воды обуславливают конечную величину электропроводности воды. Изучать электрическими методами степень чистоты воды, в которой дополнительно может содержаться 10^{-7} и менее посторонних примесных ионов (например меди, железа и т. д.) становится весьма проблематич-

ной, практически неразрешимой задачей. И на аноде, и на катоде под действием постоянного напряжения будут реализовываться анодные и катодные процессы, неизбежно приводящие к загрязнению контролируемой воды.

Рекомендуемые ГОСТами и стандартами электродные системы для контроля свойств чистых жидкостей [1, 2] по нашему мнению требуют коррекции.

На рисунке 1, а и б представлены зависимости тангенса угла потерь от частоты измерительного сигнала (амплитуда сигнала составляла 0,7 В, использовался прибор Е7-25 производства МНИПИ РБ). Данные получены при нормальных условиях для деионизованной воды производства ОАО «Интеграл». Один график получен для платинового датчика (платина имела непосредственный контакт с водой), а другой для платины, изолированной от воды тефлоновым диэлектриком. В качестве диэлектрика может быть использован любой другой диэлектрический материал с тангенсом угла потерь 0,001 и менее. Это обусловлено тем, что $\text{tg}\delta$ для деионизованной воды находится в пределах 0,1–3 единиц (в зависимости от частоты измерительного сигнала).

На частотной зависимости $\text{tg}\delta$ ярко выражены максимумы, характерные для релаксационных механизмов поляризации: для изолированного от раствора датчика максимум $\text{tg}\delta$ соответствует частоте измерительного сигнала 10^5 Гц, а для датчика, контактирующего с водой, соответствующая частота находится в пределах 5–7 кГц. В соответствии с теорией [3], этим максимумам соответствует энергия связи поляризующихся частиц 0,46 и 0,54 эВ соответственно. Расчет энергии активации (свободной энергии активации дипольного механизма поляризации) ΔE осуществлялся по формуле: $f = \frac{kT}{h} e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$, где k – постоянная Больцмана, T – температура проведения эксперимента (300 К), h – постоянная Планка. При этом частоты, соответствующие максимумам $\text{tg}\delta$, отличаются примерно в 20 раз! Поэтому, с точки зрения структуры и свойств воды данные по рисунку 1, а не могут нести до-

стоверной информации. Причина – «маскирование» истинных объемных свойств воды анодно-катодными процессами, которые реализуются на границе раздела «металл-вода».

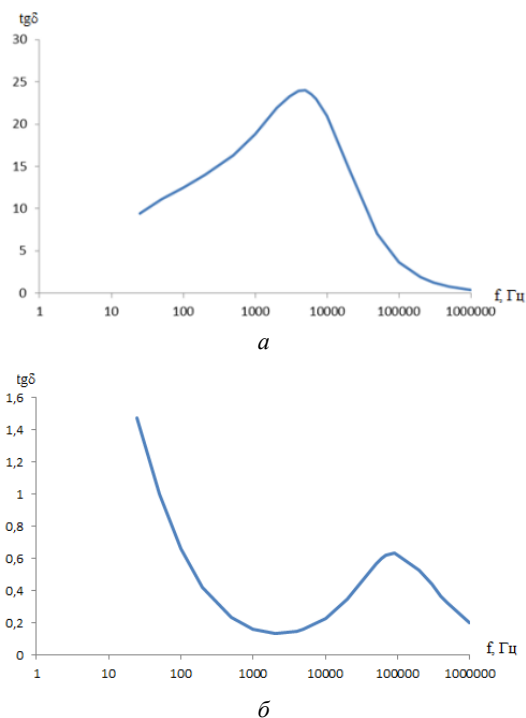


Рисунок 1 – Зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты измерительного сигнала для (а) Pt датчика в деионизованной воде и (б) для Pt датчика, покрытого тефлоном, в деионизованной воде

Как видно из рисунка 1, б характерно также численное значение $\text{tg}\delta$ от 0,1 (частота 2 кГц) до 1,5 единиц (частота 25 Гц); с ростом частоты $\text{tg}\delta$ уменьшается. Для рисунка 1, а в этом же диапазоне частот $\text{tg}\delta$ возрастает от 9,5 единиц до 24, т. е. численное значение $\text{tg}\delta$ на порядок больше, чем для рисунка 1, б. Здесь также просматривается маскирующее влияние анодно-катодных реакций на регистрируемое значение тангенса.

Важной иммитансной характеристикой является и набор эквивалентных сопротивлений, и емкостей для простейших схем замещения – последовательной и параллельной. В нашей работе осуществлена регистрация полного набора упомянутых величин.

Следует отметить, что при этом величина $\text{tg}\delta$ может быть описана следующей формулой: $\text{tg}\delta = 1/RC\omega$, где $\omega = 2\pi f$. В работах [4, 5] было показано, что эта формула для $\text{tg}\delta$ эквивалентна следующей формуле: $\text{tg}\delta = 1/\rho\varepsilon_r\omega$, где ρ – эквивалентное удельное сопротивление, ε_r – эквивалентная диэлектрическая проницаемость. Поэтому, зная, как ведет себя с изменением частоты $\text{tg}\delta$ и, например, величина эквивалентной емкости, можно установить как ведет себя с изменением частоты величина эквивалентного сопротивления, а следовательно получить частотную зависимость эквивалентного удельного сопро-

тивления и величины эквивалентной диэлектрической проницаемости. Особые условия для возможности реализации такого анализа в текст данной работы не включены.

В случае использования датчика, материал которого находится в непосредственном контакте с водой, значение эквивалентной емкости уменьшается от величины 10^5 пФ (при частоте 25 Гц) до 100 пФ при частоте 1 МГц. Убыль этой емкости – монотонная, не содержащая не только максимумов, но и перегибов типа «выпуклая-вогнутая» зависимость.

В случае использования датчика покрытого тефлоном, численные значения эквивалентной емкости также убывают. Однако при частоте 25 Гц значение емкости составляет около 3000 пФ, т. е. более чем в 30 раз меньше, чем для «открытого» датчика. На частоте 1 МГц величина емкости равна 100 пФ, что также меньше, но уже только в 4 раза, чем для «открытого» датчика. Кроме этого, наблюдаются участки типа «выпуклая-вогнутая» зависимости на трех фрагментах частотной зависимости эквивалентной емкости. Причины этого связываются с поведением $\text{tg}\delta$ (рисунок 1 а, б) и могут быть обсуждены в докладе.

Выводы

Рекомендуемые ГОСТами и стандартами материалы электродов для изучения свойств воды непригодны: электроды (индифферентные) анодно и катодно не взаимодействуют с водой, но при этом на них реализуется электролиз воды. Это приводит по существу к «загрязнению» воды, что недопустимо при исследовании свойств воды высокой степени чистоты. Кроме этого, информация об энергии связи поляризующихся молекул также искажается.

Литература

1. Национальный стандарт Российской Федерации: Жидкости изоляционные. ГОСТ Р МЭК 61620-2013, М., Стандартиформ, 2014.
2. Национальный стандарт Российской Федерации: Жидкости изоляционные. ГОСТ Р МЭК 60247-2013, М., Стандартиформ, 2014.
3. Ахадов, Я.Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. Справочник. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 412 с.
4. Петрович, В.А. Датчики контроля электрофизических свойств жидких диэлектриков / А.И. Кузьмич, Е.И. Раевич, В.А. Петрович, В.В. Баранов, В.Ю. Серенков // Труды XVIII МНПК «Современные информационные и электронные технологии». – Одесса, 2017, с. 52–53.
5. Петрович В.А. Датчики контроля свойств смазочных масел / В.В. Баранов, И.В. Батурия, А.И. Кузьмич, В.А. Петрович, В.Ю. Серенков, Г.М. Шахлевич // Матер. 10 МНПК «Приборостроение 2017». – Минск, БНТУ, 2017, с. 100–101.