

I.A. Novikov, S.V. Petrovih, S.A. Yakovlev

MODIFIED ELECTROCAPACITIVE METHOD FOR NANOMETROLOGY

Igor Novikov – Professor, the Department of Small Arms, Artillery and Rocket Weapons, D.F. Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg; **e-mail: novikov_ia@voenmeh.ru.**

Sergey Petrovih – Leading Engineer, the Department of Small Arms, Artillery and Rocket Weapons, D.F. Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», St. Petersburg; **e-mail: ptv45sv@rambler.ru.**

Sergey Yakovlev – Lecturer, the Department of Small Arms, Artillery and Rocket Weapons, D.F. Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», St. Petersburg; **e-mail: iakovlev_sa@voenmeh.ru.**

We offer a modification of the two-electrode electrocapacitive method using a liquid-metal fusible electrode. The modified method can be used to measure dielectric nanometer films placed on a metal substrate of random shape. The work description includes an electrophysical model of measurements, the stand block diagram, the measurements technique. The formulas were obtained to process the measurement results and to determine the nanocoating depth. We suggest implementing the method using the measuring stand made of a measuring cell, electronic components, and a computer. The computer is used for mathematical processing of measurement results as well as algorithms to calculate the depth of the nanocoating. We carried out certain measurements for organofluoricananocoating applied on flat metal samples. Measurements were carried out for nanocoating with a single molecular layer, and with multimolecular layers. The results of measurementsprocessing showed that the modified electrocapacitive method is accurate enough.

Keywords: *modified; electrocapacitive method' liquid metal; electrode; nanometrology; nanoindustry; dielectric; thin; film; nanocoating.*

И.А. Новиков, С.В. Петровых, С.А. Яковлев

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫЙ МЕТОД ДЛЯ НАНОМЕТРОЛОГИИ

Игорь Алексеевич Новиков – профессор кафедры «Стрелково-пушечное, артиллерийское и ракетное оружие», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, доктор технических наук, профессор, г. Санкт-Петербург; **e-mail: novikov_ia@voenmeh.ru.**

Сергей Викторович Петровых – ведущий инженер, кафедра «Стрелково-пушечное, артиллерийское и ракетное оружие», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург; **e-mail: ptv45sv@rambler.ru.**

Сергей Александрович Яковлев – преподаватель кафедры «Стрелково-пушечное, артиллерийское и ракетное оружие», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург; **e-mail: iakovlev_sa@voenmeh.ru.**

В статье предложена модификация двухэлектродного электроемкостного метода с использованием жидкометаллического легкоплавкого электрода. Модифицированный метод можно использовать для измерений диэлектрических пленок нанометровой толщины, нанесенных на металлическую подложку произвольной формы. Описание проведенной работы содержит электрофизическую модель измерений, структурную схему установки, методику измерений. Также получены формулы для обработки результатов измерений, которые позволяют вычислять толщину нанопокртия. Предложена реализация метода с помощью измерительного стенда, который состоит из измерительной ячейки, электронных блоков, и компьютера. В компьютере реализованы математиче-

ская обработка результатов измерений и алгоритмы для вычисления толщины нанопокрывтия. Выполнена серия измерений для фторорганических нанопокрывтий, нанесенных на плоские металлические образцы. Были проведены измерения для нанопокрывтий с одномолекулярным слоем и с многомолекулярными слоями. Результаты обработки измерений показали, что модифицированный электроемкостный метод имеет достаточно высокую точность.

Ключевые слова: *модифицированный; электроемкостный метод; жидкий металл; электрод; нанометрология; наноиндустрия; диэлектрик; тонкий; пленка; нанопокрывтие.*

Введение. В настоящее время нанопродукция первого уровня – пассивные нанопокрывтия толщиной от 0,5 нм до 200 нм – находит широкое применение в технике и занимает свою нишу на потребительском рынке. Как показывает практика, данные нанопокрывтия могут оказывать эффект повышения прочностных свойств изделий, повышать их антикоррозионные и антифрикционные свойства. Структура, состав и технологии нанесения нанопокрывтий могут быть различными [7]. Одним из факторов, сдерживающих развитие и использование технологий нанесения нанопокрывтий, является отсутствие надежного оборудования и средств измерения, применимых для наноиндустрии. Толщину нанопокрывтий контролируют посредством разрушающих и неразрушающих методов и средств измерений (далее – СИ). Применение неразрушающих методов контроля толщины покрытий зависит от вида покрытий и материала детали [8]. Анализ существующих современных средств измерений для нанометрологии показал, что они могут обладать требуемыми разрешающей способностью и точностью измерений толщины нанопокрывтий в диапазоне 0,5–200 нм, но они могут использоваться только в лабораторных условиях, и работать на них могут только профессионалы высокой квалификации. При этом стоимость таких СИ чрезвычайно высока. Таким образом, среди неразрушающих СИ, применяемых в нанометрологии, не существует методов и средств измерений, которые можно использовать в условиях производства. Не менее важно иметь методы измерений для тонких пленок, которые нанесены на изделия с произвольной формой поверхности.

Одно из направлений современной наноиндустрии – это применение разно-

образных функциональных нанопокрывтий с толщиной нанопокрывтий от 4 нм до 80–100 нм [3; 7]. В современной технике (энергетике, машиностроении, др.) широко используются диэлектрические тонкие пленки нанометровой толщины, нанесенные на поверхности металлических изделий. Среди них большую нишу занимают нанопокрывтия на основе фторорганических полимеров. На основе таких фторполимеров появились антифрикционные и защитные композиции (эпиламы), существенно продлевающие ресурс деталей в машиностроении, а также элементов микроэлектроники, причем в настоящее время технологии нанесения покрытий на основе фторированных поверхностно-активных веществ (далее – ФПАВ) переживает второе рождение. Это направление хорошо зарекомендовало себя как метод повышения надежности и долговечности машин, станков, инструментов, технологической оснастки, рабочих поверхностей пар трения. Закрепление покрытия на металлической поверхности происходит за счет хемосорбции, что позволяет получать монослой средней толщиной 7 нм (разброс высоты фторорганических молекул от 4 нм до 10 нм) с высокой адгезионной прочностью [2; 3; 4]. Последующие слои молекул полимеров связываются когезионным взаимодействием. Для разных задач используются одно- и многомолекулярные слои. Такие нанослои ФПАВ пленки обладают способностью снижать трение при контакте с поверхностью из любого материала. Эпиламирование относится к области получения сверхтонких полимерных покрытий на основе перфторполиэфиров или их производных и может быть использовано для повышения эффективности металлообрабатывающего инструмента, узлов трения и скольжения различных машин и механизмов [2; 4].

Для решения разных задач по улучшению технических характеристик (износостойкости, коррозионной стойкости и др.) изделий применяются как однослойные, так и многослойные тонкие пленки ФПАВ.

При этом необходимо решить следующие задачи:

- создать, отработать и усовершенствовать технологию нанесения фторполимеров на промышленное изделие (в том числе, металлическое), при этом его поверхность может быть криволинейной;

- оценить качество нанесенного на деталь нанопокрyтия;

- проверить (оценить) эффективность нанопокрyтия в процессе эксплуатации изделия.

Для решения всех этих задач необходимо иметь методы и средства нанометрологии, которые могли бы применяться не только в лабораторных условиях, но и в технологических процессах изготовления и контроля нанопродукции на самом производстве [2; 4; 7; 8]. В настоящее время таких методов не существует. Все существующие методы нанометрологии – это лабораторные методы, требующие «чистых» помещений, высококлассного персонала, сверхдорогого оборудования, больших временных затрат и трудоемкости [8].

В работе предлагается модификация двухэлектродного электроемкостного метода, позволяющая использовать его для задач нанометрологии. Основной идеей метода является замена одного измерительного электрода на жидкометаллический электрод, выполненный из легкоплавкого нетоксичного металла, или сплава металлов. В работе для этой цели использовался галлий. В методе в качестве второго электрода используется поверхность металлического изделия (детали). Такой электроемкостный метод можно применять для неразрушающих измерений диэлектрических нанопокрyтий, в том числе полимерных, нанесенных на металлические поверхности деталей.

В работе описаны: электрофизическая модель измерений, формулы для обработки результатов измерений. Они позволяют вычислить толщину покрyтия по полу-

ченным результатам. Этот метод был реализован в виде измерительного стенда, фото которого представлено в работе. На стенде были проведены измерения параметров фторорганических нанопокрyтий, нанесенных на металлические образцы. Результаты измерений совпали с известными теоретическими и экспериментальными параметрами однослойных нанопокрyтий. Это подтверждает возможности данного метода для измерений диэлектрических пленок нанометрового размера на плоскости или поверхности металлических деталей произвольной формы.

Основные составляющие электроемкостного метода с жидкометаллическими электродами. Существующие в настоящее время неразрушающие прямые и косвенные методы измерения и контроля толщин диэлектрических тонких пленок нанометрового диапазона имеют ряд особенностей. Например, для косвенного электроемкостного метода измерения необходимо, чтобы электроды датчиков (сенсорные элементы) находились с обеих сторон измеряемой пленки, для других достаточно расположить датчики только с одной его стороны. Методы различаются также по точности измерения, быстродействию, достоверности результатов, возможности автоматизации измерений, и документирования их результатов. Важным свойством метода измерений является его применимость не только в лабораторных, но и в промышленных условиях, а также стоимость практической реализации метода и трудоемкость. Для производителей важно делать измерения в реальных условиях с высокой точностью и разрешающей способностью. Перечисленные требования совместить очень трудно.

В предлагаемом модифицированном методе в качестве основного элемента метода предлагается измерительная ячейка.

Измерительная ячейка (далее – ИЯ). Она показана на фиг. 1а и предназначена для исследования электрических свойств тонких диэлектрических покрyтий на металлических подложках электроемкостным методом с использованием жидкометаллического контакта. На фиг. 1а показано: 1 – металлическая подложка; 2 – тон-

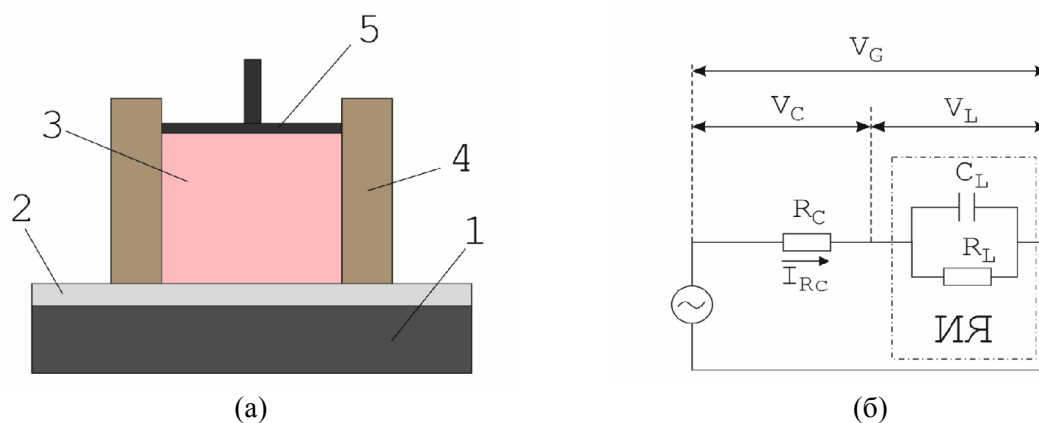


Рис. 1. Устройство (конструкция) ИЯ и ее эквивалентная электрическая схема

кая пленка; 3 – жидкометаллический электрод; 4 – кювета; 5 – металлический электрод. С помощью ИЯ измеряется модуль электрического импеданса тонкой диэлектрической пленки для разных частот из диапазона используемых частот (0,2 Гц – 10 МГц) в методе. При этом один электрический контакт – это металлическая поверхность (1), на которую нанесена тонкая пленка (2). Для контакта со стороны диэлектрического слоя в измерительном электроде (фиг. 1а) используют легкоплавкие жидкие малотоксичные и малоактивные металлы (3) или их сплавы (галлий, русский сплав и другие) [8]. Такой метод измерения и конструкция ИЯ обеспечивают надежный контакт и повышение точности измерений за счет заполнения микронеровностей, которые определяются микрогеометрией поверхности. Это позволяет использовать электроемкостный метод для измерения тонких нанометровых пленок. При этом конструкция и материалы для ИЯ должны обеспечивать возможность измерений электрического импеданса внутри ячейки и, одновременно, герметичность электрического контакта по отношению к внешней области. В качестве конструкционных материалов удобно использовать эластомеры, текстолит или фторопласт. Размеры кюветы можно варьировать, что позволяет измерять как локальные, так и глобальные параметры толщины образца.

Применение жидкометаллического электрода в электроемкостном методе (далее – ЭМ) позволяет преодолеть основной недостаток метода – погрешности

измерений, обусловленные топографией поверхности тонкой диэлектрической пленки. В процессе определения толщины пленки эти погрешности быстро возрастают при уменьшении толщины пленки до нанометровых величин. Устранение этого недостатка позволяет расширить область применения ЭМ на тонкие пленки нанометровой толщины, а также применять ЭМ для пленок, нанесенных на криволинейные поверхности. Для реализации предложенного метода используется измерительная ячейка, которая в измеряемой ограниченной области обеспечивает электрический контакт с внешней поверхностью диэлектрической пленки. В то же время конструкция и эластичные свойства материала ИЯ обеспечивают ее герметичность. В качестве жидкого металла может использоваться легкоплавкий малотоксичный металл или сплав. В настоящее время имеется достаточно много таких сплавов, например, русский сплав [5]. В работе был использован металл галлий. Варьируя размеры ИЯ для разных целей, можно измерить среднюю (по площади ИЯ) толщину пленки. Тем самым, метод можно использовать для разных применений, в том числе, для обнаружения сквозных микродефектов (микротрещин, микроотверстий и др.) тонких пленок. Кроме того, ИЯ могут быть выполнены в виде набора измерительных линеек или матрицы детекторов, что существенно расширяет области применений метода. Конструкция ИЯ показана на рис. 1а.

Методика измерений и расчетные формулы метода. ИЯ – это основной эле-

мент метода. Получаемой информацией в результате измерений в методе является набор значений абсолютной величины (модуля) электрического импеданса, измеряемого в широкой области частот. На рис. 1б показана эквивалентная электрическая схема измерений метода с учетом ИЯ. Электрофизическая модель диэлектрической (или полимерной) пленки описывается параллельной RC цепочкой, показанной на фиг. 1б. На ней R_L и C_L – это неизвестные электрические параметры тонкой диэлектрической пленки, входящие в ИЯ, которые необходимо определить; а R_C – высокоточный калибровочный резистор. Напряжения V_G , V_C , V_L – это, соответственно, амплитуды напряжений от генератора, на калибровочном резисторе и на ИЯ. В процессе измерений для разных частот измеряются амплитуды напряжений V_C и V_L . Последняя вычисляется как амплитуда разности напряжений с генератора и с калибровочного резистора (функция вычитания напряжений и определения амплитуды реализуется в цифровом осциллографе). После этого, определяется модуль электрического импеданса ИЯ $|Z_{L0}|$ по формулам:

$$I_{RC} = \frac{V_C}{R_C}; \quad |Z_{L0}(\omega)| = \frac{V_L}{I_{RC}} = \frac{R_C V_L}{V_C}. \quad (1)$$

Здесь I_{RC} – ток, текущий через калибровочный резистор, а амплитуды напряжений V_L и V_C для каждой частоты определяются в процессе измерений. С учетом эквивалентной электрической схемы (фиг. 1б) для модуля импеданса $|Z_L|$ получено аналитическое выражение вида:

$$|Z_L(\omega)| = \frac{R_L}{\sqrt{B(\omega)}}, \quad \tau = R_L \cdot C_L; \quad (2)$$

$$B(\omega) = 1 + \omega^2 \cdot \tau^2.$$

В результате сравнения результатов формулы (2) с результатами измерений $|Z_{L0}(\omega)|$ определяются параметры электрической схемы, такие как R_L и C_L . Параметр R_L определяется из анализа формулы (1), (2) посредством соотношения, выполняющегося что при низких частотах ($\omega \rightarrow 0$):

$$R_L = |Z_{L0}|. \quad (3)$$

Поэтому для нахождения R_L используется графический метод определения при низких частотах. Второй параметр C_L (электрическую емкость ИЯ) определяют

посредством аппроксимации измеренных значений $|Z_{L0}(\omega)|$ аналитическим выражением (2) для $|Z_L(\omega)|$. При этом используется метод наименьших квадратов (МНК).

Полученную величину емкости можно использовать для нахождения толщины измеренного слоя тонкой диэлектрической пленки по формуле:

$$d = \frac{\varepsilon \cdot K_0}{C_L}; \quad K_0 = \varepsilon_0 \cdot S. \quad (4)$$

Здесь: d (м) – средняя толщина пленки (по измеряемой области в ИЯ), $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, ε – относительная диэлектрическая проницаемость измеряемой пленки, C_L – вычисленная электрическая емкость диэлектрической тонкой пленки, S (м²) – площадь жидкометаллического контакта, обусловленного внутренними размерами кюветы. В (4) величина K_0 – конструктивный параметр кюветы ИЯ, изменяя который можно обеспечить многофункциональность применения метода, как для лабораторных исследований, так и для промышленного использования. Относительная диэлектрическая проницаемость материала пленки определяется в результате дополнительных измерений по известной методике [6].

Структурная схема измерительного стенда для реализации метода. Описанный метод измерений для определения толщины тонких диэлектрических пленок, нанесенных на металлическую поверхность произвольной формы, осуществляется с помощью измерительного стенда, представленного на рис. 2.

Измерительный стенд в себе содержит:

- измерительную ячейку (ИЯ), представленную на рис. 1а;
- электронный блок измерений;
- цифровую схему регистрации; (цифровой осциллограф, включающий в себя АЦП);
- генератор электрического тока от 0,2 Гц до 1 МГц;
- персональный компьютер.

Электронный блок измерений содержит набор образцовых высокоточных резисторов с коммутатором для их переключения, два буферных усилителя для уменьшения влияния входных емкостей

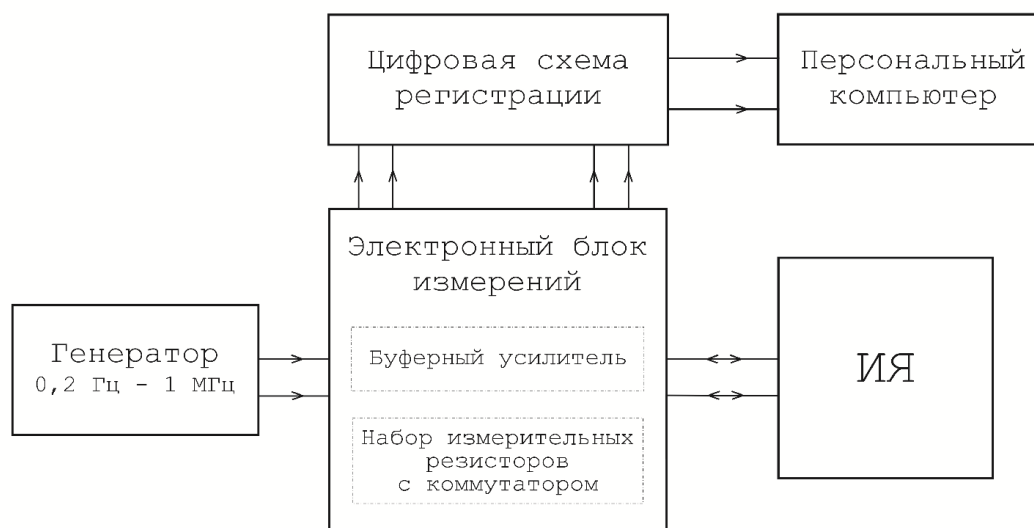


Рис. 2. Структурная схема измерительного стенда

осциллографа и подключенных к нему кабелей на результаты измерений.

Цифровая схема регистрации представляет собой цифровой четырехканальный осциллограф с быстродействующим высокоразрядным АЦП ($N=14$) и коммутатором.

В персональном компьютере производится обработка данных измерений по нижеприведенным формулам. А также на дисплее компьютера строятся графики зависимости исходных данных и измерений от частоты.

Измерительный стенд для реализации метода. Предлагаемый метод был реализован посредством измерительного стенда, фото которого представлено на рис 3. В стенд входят: 1 – источник питания, 2 – генератор, 3 – цифровой осциллограф, 4 – измерительная ячейка (ИЯ); 5 – компьютер (РС), 6 – электронный блок. Генератор типа JD6600-60M позволяет устанавливать частоту гармонического сигнала в диапазоне 0,001 Гц – 60 МГц и амплитуду сигнала в пределах 1 мВ – 20 В. Осциллограф цифровой DSJ4104B, четырехканальный с полосой пропускания от нуля до 60 МГц и чувствительностью вертикального отклонения луча 0,5 мВ/дел. Блок буферных усилителей содержит набор резисторов от 51 Ом до 1 МОм с переключателем и два буферных усилителя для уменьшения влияния входных емкостей осциллографа и подключенных к не-

му кабелей на результаты измерений. В качестве двух полярного источника питания использованы два лабораторных стабилизированных источника ИПС-1.

В стенде используются гармонические зондирующие напряжения с малой амплитудой (10–25 мВ), что обеспечивает линейный отклик для зондирующего воздействия и измерительного сигнала.

Измерительный стенд был откалиброван во всей области частот на особо точных конденсаторах и резисторах, включенных вместо ИЯ. Калибровка измерительного тракта проводилась с использованием конденсаторов емкостью 20 пФ \pm 5%, 100 пФ \pm 5% и 300 пФ \pm 5%. Каждый из этих конденсаторов подключался через кабель вместо измерительной ячейки. Измерения проводились в диапазоне частот 10 Гц – 200 кГц при амплитуде сигнала с генератора 1 В. Проведенная калибровка показала, что реализованный стенд имеет необходимую для измерений точность (погрешность) определения импеданса в диапазоне частот от 500 Гц до 20 кГц. Вне этого диапазона погрешность определения импеданса увеличивается. Результаты проведенных экспериментов показали, что диапазон 200 Гц – 10 кГц удобен для реализации МНК и определения толщин, исследуемых ФПАВ нанопокртий.

Подробное устройство ИЯ, в которой реализованы четыре зоны измерений,

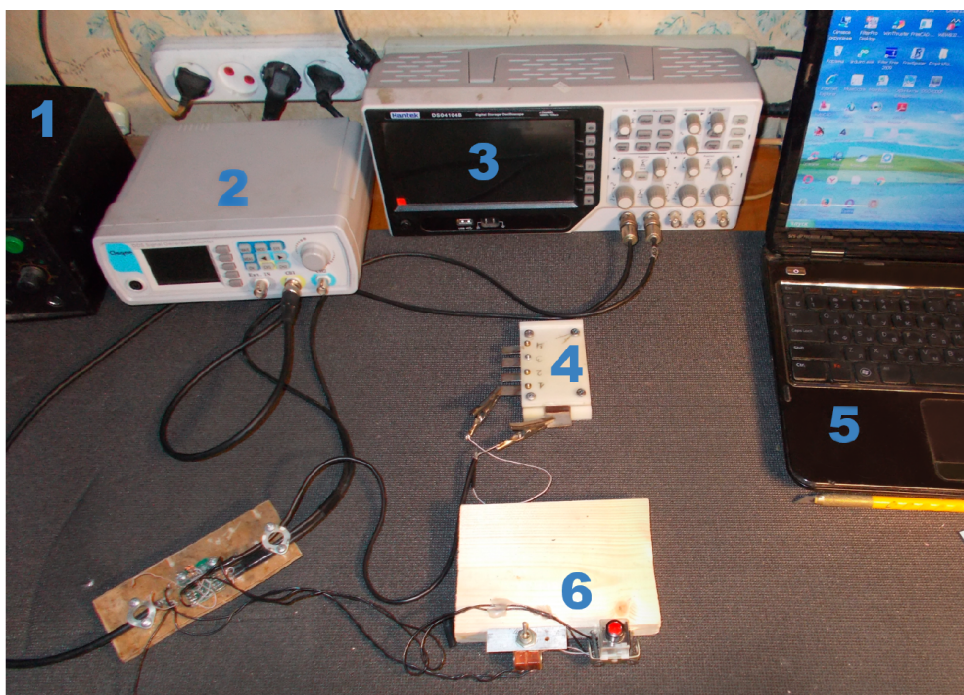
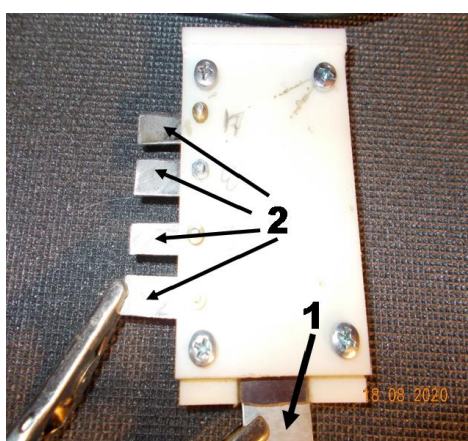
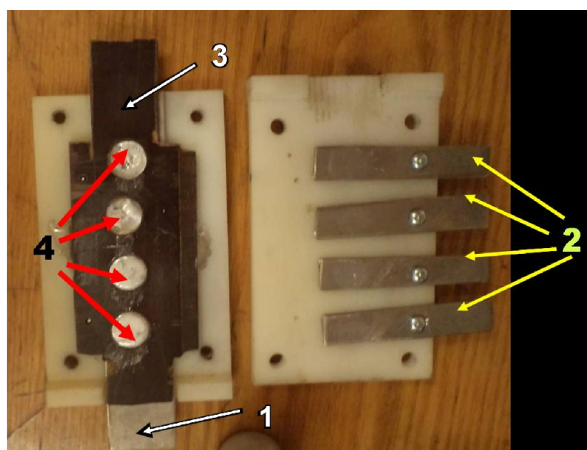


Рис. 3. Измерительный стенд для модифицированного электроемкостного метода



а)



б)

Рис. 4. Внешний вид (а) и внутреннее устройство (б) измерительной ячейки, включающей в себя четыре измерительных зоны

вместе с образцом и жидкометаллическими электродами показано на рис. 4.

На рис. 4а показан внешний вид ИЯ, при этом обозначено: 1 – измеряемый объект (пластина прямоугольного сечения из нержавеющей стали), 2 – измерительные электроды, каждый из которых соответствует своей зоне измерения. На рис. 4б показана внутренняя конструкция ИЯ. Кроме описанных выше элементов, здесь представлены: 3 – текстолитовая прокладка, внутри которой сформированы четыре измерительные зоны, 4 – жидкометаллические электроды. При реализации метода в конструкции ИЯ использовались кюве-

ты с круглыми отверстиями диаметром 10 мм, и площадью равной $S = 7,854 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$. Диэлектрические прокладки выполнены из текстолита толщиной 1,0 мм. В качестве легкоплавкого металла использовался галлий.

Результаты измерений и их обсуждение. Апробация предложенного метода измерений была проведена на плоских металлических образцах с использованием полимерной фтороорганической композиции типа 6СФК-180-05. Для реализации метода необходимо знать диэлектрическую проницаемость диэлектрической пленки. Она определялась из дополни-

тельной серии измерений стандартным емкостным методом [1] в области частот от 2 Гц до 200 кГц (15 точек измерений). В результате была получена средняя величина относительной диэлектрической проницаемости материала пленки $\epsilon = 2,67$. При этом его среднеквадратическое отклонение (СКО) составило $\text{СКО} = 0,113$. В этих измерениях толщина слоя фторорганической композиции типа 6СФК-180-05 составляла $1,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Для получения тонкой пленки ФПАВ на образцах использовались технологии нанесения пленки, обеспечивающие как многомолекулярные слои, так и мономолекулярный слой ФПАВ. При обработке измерений удобно использовать графические зависимости функций $|Z_{L0}(\omega)|$ и $|Z_L(\omega)|$, чтобы наглядно представить частотную динамику этих функций.

Первый вариант проведенных измерений выполнен на основе технологии, позволяющей нанести мономолекулярный слой фторорганической композиции. Графики электрических импедансов (результаты измерений и расчетные результаты с использованием МНК) представлены на рис. 5.

Расчеты параметров ИЯ по формулам (1) – (3) с использованием МНК приводят к следующим результатам:

$$R_L = 1500 \text{ Ом}; \quad C_L = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}. \quad (5)$$

Используя формулу (4) и учитывая

параметры ИЯ (прямоугольная ячейка $20 \cdot 15 \text{ мм}^2$), получим расчетную толщину измеренного нанослоя:

$$d = 7,5 \text{ нм}. \quad (6)$$

Таким образом, с помощью модифицированного электроемкостного метода удалось определить толщину мономолекулярного слоя фторорганической композиции типа 6СФК-180-05. Эта величина соответствует измерениям мономеров на сканирующем электронном микроскопе [9], которая составляет 7,1 нм. При этом, относительная погрешность определения размеров молекулы составляет 5–6%.

Для второго варианта измерений была использована технология нанесения ФПАВ на металлический образец, обеспечивающая многомолекулярные слои фторорганической композиции типа 6СФК-180-05. На рис. 6 представлены графики измеренных импедансов и результатов аппроксимации в низкочастотной области, в которой имеются наибольшие отклонения измеренной функции от аппроксимирующей зависимости.

Используя результаты измерений, формулы (1) – (3) и метод МНК, определили электрические параметры ИЯ:

$$R_L = 16000 \text{ Ом}; \quad C_L = 1,4 \cdot 10^{-8}; \quad \Phi = 14000 \text{ пФ}. \quad (7)$$

Полученные параметры ИЯ, можно использовать для нахождения толщины измеренного слоя ФПАВ. Используя формулу (4) и учитывая параметры ИЯ

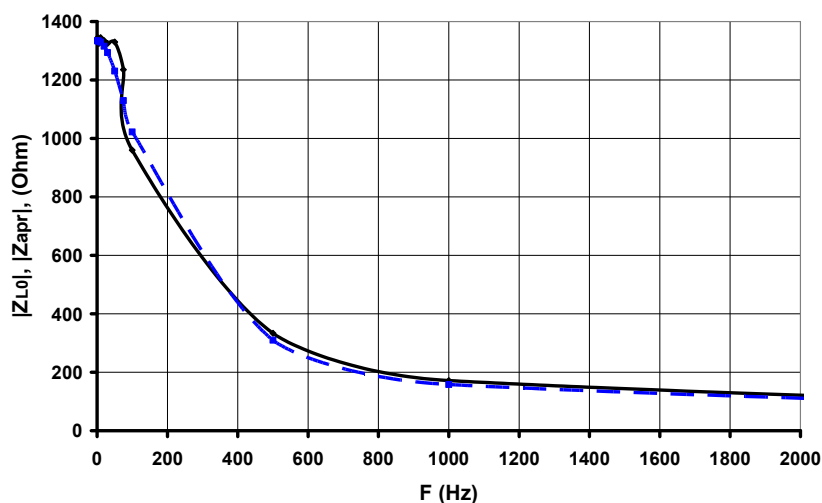


Рис. 5. Модуль измеренного импеданса (сплошная кривая) и результат МНК аппроксимации – аналитическая кривая (штрихпунктирная кривая) для нанопокртия, состоящего из мономолекулярного слоя фторорганической композиции типа 6СФК-180-05

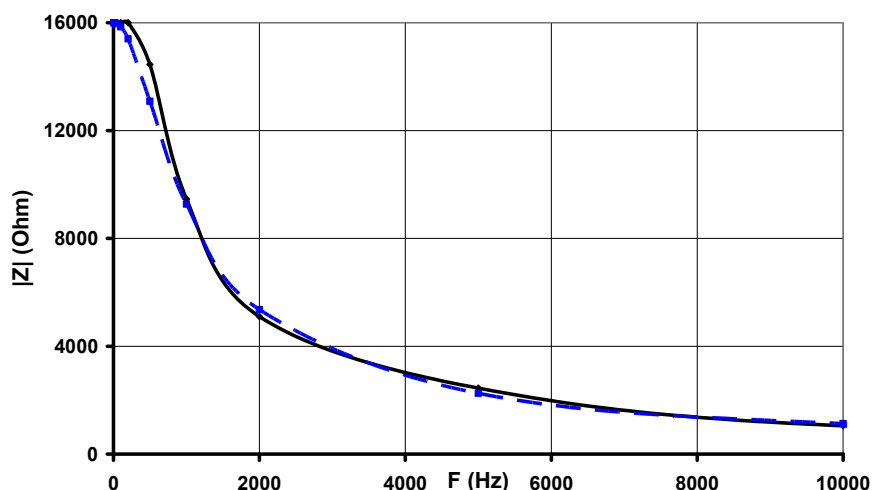


Рис. 6. Модуль измеренного импеданса (сплошная кривая) и результат МНК аппроксимации – аналитическая кривая (штрихпунктирная кривая) для нанопокрyтия, состоящего из многомолекулярного слоя фторорганической композиции типа 6СФК-180-05

($S = 7.854 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$), получим расчетную толщину измеренного многослойного нанопокрyтия:

$$d = 132 \text{ нм.} \quad (8)$$

Эти параметры толщины соответствуют многомолекулярной тонкой пленке с 25–35 слоями.

Основные выводы. В работе описаны основы нового электроемкостного метода, который применим для нанометрологии в условиях лабораторных исследований и промышленного производства. Проведенная апробация показывает адекватность и эффективность предложенного способа для определения толщины тонких диэлектрических пленок нанометровых размеров, нанесенных на плоский металлический образец. Отметим, что предложенный метод имеет много направлений своего развития. Например, его можно использовать для обнаружения сквозных микродефектов (микротрещин, микроотверстий и др.) тонких пленок. Также он имеет большие перспективы для реализации практических средств измерений в области нанометрологии и наноиндустрии. Особенно важно для наноиндустрии, т.к. в настоящее время отсутствуют нанометрологические средства измерения для условий производства, что является дополнительным ограничением для ее развития.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 22372-77 «Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до $5 \cdot 10^6$ Гц...» // Электронный фонд правовой и нормативно-технической информации: [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200016160> (дата обращения: 09.10.2021).
- Вохидов А., Добровольский Л. Эпиламирование: эффективный метод создания пленок // Наноиндустрия. 2012. № 4 (34). С. 32–35.
- Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность). М.: Изд-во МСХА, 2001. 616 с.
- Логунов В.В., Амирханов Е.И., Новиков И.А. Технология повышения показателей надежности оболочек и инструментов в технике // Металлообработка. 2018. № 5 (107). С. 30–36.
- «Жидкий металл» как термоинтерфейс // Electrosad: [сайт]. URL: <http://www.electrosad.ru/Ohlajd/Metall.htm> (дата обращения: 09.10.2021).
- Можен М. Механика электромагнитных сплошных сред / пер. с англ. М.: 1991. 560 с.
- Никифоров С., Яминский И., Алексеев А., Бурлуцкий Д., Смагулова Д. Функциональные нанопокрyтия: тенденции и перспективы // Наноиндустрия. 2015. №

2(56). С. 18–25.

8. *Тодуа П., Гавриленко В.* Нанометрология – основа устойчивого развития нанотехнологий // *Наноиндустрия*. 2013. № 5(43). С. 6–18.

9. *Эйсмонт Е.И., Овчинников Е.В.,*

Чекан Н.М., Пинчук Т.И. Морфология тонкопленочных покрытий, сформированных на металлических субстратах // *Порошковая металлургия: сб. науч. трудов / ГНУ «Институт порошковой металлургии»*. Минск, 2017. С. 239–243.