



УДК 53.087.44
doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-14



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Моделирование диэлектрической спектроскопии покрытия, полученного методом микродугового оксидирования

Ульяна Сергеевна Чихрина

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
chikhulyana@yandex.ru

Сергей Сергеевич Хрянин

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
shryanin@yandex.ru

Виктор Алексеевич Баранов

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
baranov_va2202@mail.ru

Аннотация. Рассматривается исследование диэлектрического покрытия, полученного методом микродугового оксидирования, при помощи диэлектрической спектроскопии. Рассматривается проблема отделения собственного импеданса емкостного датчика от импеданса исследуемого образца диэлектрика.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, диэлектрическая спектроскопия, емкостный датчик, импеданс, диэлектрик

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные основы цифрового двойника технологического процесса формирования оксидных покрытий с заданными свойствами методом микродугового оксидирования», № 123091800009-1.

Для цитирования: Чихрина У. С., Хрянин С. С., Баранов В. А. Моделирование диэлектрической спектроскопии покрытия, полученного методом микродугового оксидирования // Инжиниринг и технологии. 2025. Т. 10 (1). С. 1–4. doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-14

Modeling of dielectric spectroscopy of a coating obtained by microarc oxidation

Ulyana S. Chikhrina

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
chikhulyana@yandex.ru

Sergey S. Khryanin

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
shryanin@yandex.ru

Victor A. Baranov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
baranov_va2202@mail.ru

Abstract. The article discusses the study of a dielectric coating obtained by microarc oxidation using dielectric spectroscopy. The problem of separating the intrinsic impedance of a capacitive sensor from the impedance of the dielectric sample under study is considered.

Keywords: microarc oxidation, dielectric spectroscopy, capacitive sensor, impedance, dielectric

Financing: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project "Fundamentals of the digital twin of the technological process of forming oxide coatings with specified properties by microarc oxidation", No. 123091800009-1.

For citation: Chikhrina U.S., Khryanin S.S., Baranov V.A. Modeling of dielectric spectroscopy of a coating obtained by microarc oxidation = *Engineering and Technology*. 2025;10(1):1–4. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-14



Микродуговое оксидирование (МДО) – перспективный метод формирования покрытий, улучшающих функциональные и эстетические характеристики основного материала [1]. В различных применениях МДО обеспечивает требуемую пористость, износостойкость, термостойкость, шероховатость или диэлектрические свойства (электрическую прочность, определяемую минимальным напряжением пробоя) изделия. Прямое измерение величин, отражающих эти свойства, требует дорогостоящего оборудования и занимает значительное время. В связи с этим актуальной является разработка косвенных методов измерения параметров качества МДО-покрытий.

В настоящее время неэлектрические величины во многих случаях измеряются электрическими методами [2]. Качество МДО-покрытия зависит от его состава и структуры. Составом и структурой материала определяется и его электропроводность, поэтому исследование материалов методом электрической импедансной спектроскопии (ЭИС) все шире применяется в различных отраслях науки и техники [3, 4]. Метод ЭИС состоит в измерении составляющих импеданса объекта исследования в информативном для цели исследования диапазоне частот синусоидального напряжения и синтезе математических моделей связи искомых показателей назначения МДО-покрытия со значениями составляющих импеданса.

По электрическим свойствам МДО-покрытия относятся к диэлектрикам, поэтому их свойства исследуются методом диэлектрической импедансной спектроскопии (ДИС). Особенностью ДИС является то, что датчик устройства для измерения составляющих импеданса представляет собой не систему двух и более электродов, омически взаимодействующих с объектом измерения, как при реализации метода ЭИС, а электрический конденсатор, между обкладками которого размещается объект. Достоинствами емкостного датчика являются простота, надежность и механическая прочность конструкции, бесконтактность, низкий уровень собственных шумов, наличие вторичных измерительных преобразователей напряжения – код с высокими метрологическими характеристиками [5].

Диэлектрик характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью (ОДП) (1)

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + j\varepsilon_2, \quad (1)$$

где ε_1 – диэлектрическая проницаемость; ε_2 – диэлектрические потери.

Обе составляющие ОДП зависят от частоты. В связи с этим, для получения максимально полной информации об объекте исследования необходимо определять амплитудно-фазовую частотную характеристику емкостного датчика с образцом диэлектрика в максимально широком диапазоне частот [6, 7].

Эксперименты по измерению импеданса предлагается проводить при помощи прецизионного *RLC*-измерителя KEYSIGHT E4980A, основные метрологические характеристики которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Метрологические характеристики *RLC*-измерителя KEYSIGHT E4980A

Характеристики	Описание
Измеряемые параметры	Модуль комплексного сопротивления ($ Z $), модуль комплексной проводимости ($ Y $), фазовый сдвиг (θ), активное сопротивление (R), реактивное сопротивление (X), активная проводимость (G), реактивная проводимость (B), емкость (C), тангенс угла потерь (D), добротность (Q), напряжение переменного тока (V_{ac}), сила переменного тока (I_{ac}).
Относительная погрешность	$\pm 0,05$ %
Частота тест сигнала	20 Гц – 2 МГц
Интерфейс	LAN, USB, GPIB
Уровень тест сигнала	0 В – 2 В, 0 А – 20 мА

На рисунке 1 показана конструкция емкостного датчика для ДИС изделия, полученного путем формирования на металлической подложке методом МДО двустороннего диэлектрического покрытия. Клеммы будут подключаться к выводам емкостного датчика, как показано на рисунке.

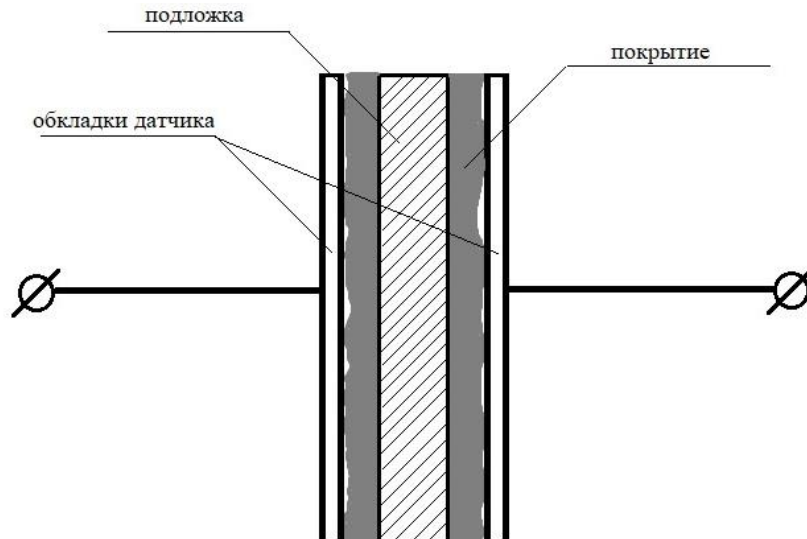


Рис. 1. Схема измерений

В первой серии экспериментов будет измеряться собственный импеданс датчика. В последующих экспериментах при помощи этого же чувствительного элемента будет измеряться импеданс образца диэлектрика. Измерения проводились в режимах $R-X$ и $Cp-Rp$, после чего строились графики АЧХ. Активная и реактивная составляющие параллельной rC -схемы описываются уравнениями (2, 3).

$$R_0 = \frac{r}{1 + \omega^2 \cdot r^2 \cdot C^2}, \quad (2)$$

$$X_0 = \frac{\omega \cdot r^2 \cdot C}{1 + \omega^2 \cdot r^2 \cdot C^2}. \quad (3)$$

Проводимость идеального емкостного датчика описывает следующее уравнение:

$$Z_0 = \frac{1}{j\omega \cdot C_0}. \quad (4)$$

При этом на практике из-за погрешностей, вносимых окружающей средой и несовершенства измерительной установки проводимость датчика описывает уравнение (5):

$$Z_0 = R_0 + jX_0. \quad (5)$$

При этом импеданс датчика с образцом диэлектрика необходимо вычислить по формуле (6):

$$Z_x = \frac{1}{j\omega C_0 \epsilon} = \frac{\epsilon_2}{\omega C_0 (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)} + \frac{j\epsilon_1}{\omega C_0 (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)} \quad (6)$$

Для повышения точности измерений импеданса необходимо установить, является ли теоретическое выражение применимым при практическом использовании. Для этого требуется провести моделирование диэлектрической спектроскопии покрытия диэлектрика и сопоставить полученные результаты с математической функцией.

Список литературы

1. Голубков П. Е., Печерская Е. А., Громков Н. В. [и др.]. Метод измерения толщины оксидного покрытия в процессе микродугового оксидирования // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2019. Т. 1. С. 300–303. EDN JNHQEI
2. Солопченко Г. Н. Измерение электрических и неэлектрических величин : учеб. пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 122 с.
3. Баранов В. А. Информационно-управляющая система для активного контроля технологических процессов производства изделий с гетерогенной структурой // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 20–29.



4. Хрянин С. С., Антипенко В. В., Рузняев А. О. [и др.]. Сравнительный анализ современных приборов для измерения биоимпеданса // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2024») : материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых, Пенза, 6–7 ноября 2024 г. Пенза : Изд-во ПГУ, 2024. С. 132–135. EDN BUSOQK
5. Чихрина У. С. Электроемкостный метод измерения показателей шероховатости поверхности изделий из диэлектриков // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2024») : материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых, Пенза, 6–7 ноября 2024 г. Пенза : Изд-во ПГУ, 2024. С. 208–211. EDN HOUZIQ
6. Печерская Е. А. Метрологический анализ установки для измерений электрофизических свойств сегнетоэлектрических образцов с линейными размерами микрометрового диапазона // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 43–47.
7. Печерская Е. А., Рябов Д. В., Якушова Н. Д. Метрологические аспекты модели активного диэлектрика // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2012. № 1. С. 208–213.

References

1. Golubkov P.E., Pecherskaja E.A., Gromkov N.V. et al. A method for measuring the thickness of an oxide coating during microarc oxidation. *Mezhdunarodnaja konferentsija po mjagkim vychislenijam i izmerenijam = International Conference on Soft Computing and Measurements*. 2019;1:300–303. (In Russ.). EDN: JNHQEI
2. Solopchenko G.N. *Izmerenie elektricheskikh i neelektricheskikh velichin: ucheb. posobie = Measurement of electrical and non-electrical quantities : textbook*. Saint Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2011:122. (In Russ.)
3. Baranov V.A. Information and control system for active control of technological processes for the production of products with a heterogeneous structure. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(3):20–29. (In Russ.)
4. Hranjan S.S., Antipenko V.V., Ruznjaev A.O. et al. *Comparative analysis of modern bioimpedance measuring devices. Metody, sredstva i tehnologii poluchenija i obrabotki izmeritelnoj informatsii («Shljandinskie chtenija – 2024»): materialy XVI Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. s elementami nauchnoj shkoly i konkursom nauchno-issledovatel'skikh rabot dlja studentov, aspirantov i molodyh uchenyh (Penza, 6–7 nojabrja 2024 g.) = Methods, tools and technologies for obtaining and processing measurement information ("Shlyandinsky Readings – 2024") : proceedings of the XVI International Scientific and Technical conference with elements of a scientific school and a competition of research papers for students, postgraduates and young scientists, Penza, November 6–7, 2024*. Penza: Izd-vo PGU, 2024:132–135. (In Russ.). EDN BUSOQK
5. Chihrina U.S. Electrical capacity method for measuring the surface roughness of products made of dielectrics. *Metody, sredstva i tehnologii poluchenija i obrabotki izmeritelnoj informatsii («Shljandinskie chtenija – 2024»): materialy XVI Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. s elementami nauchnoj shkoly i konkursom nauchno-issledovatel'skikh rabot dlja studentov, aspirantov i molodyh uchenyh (Penza, 6–7 nojabrja 2024 g.) = Methods, tools and technologies for obtaining and processing measurement information ("Shlyandinsky Readings – 2024") : proceedings of the XVI International Scientific and Technical conference with elements of a scientific school and a competition of research papers for students, postgraduates and young scientists, Penza, November 6–7, 2024*. Penza: Izd-vo PGU, 2024:208–211. (In Russ.). EDN: HOUZIQ
6. Pecherskaja E.A. Metrological analysis of an installation for measuring the electrophysical properties of ferroelectric samples with linear dimensions of the micrometer range. *Nano- i mikrosistemnaja tehnika = Nano- and microsystem engineering*. 2007;(12):43–47. (In Russ.)
7. Pecherskaja E.A., Rjabov D.V., Jakushova N.D. Metrological aspects of the active dielectric model. *Innovatsii na osnove informatsionnyh i kommunikatsionnyh tehnologij = Innovations based on information and communication technologies*. 2012;(1):208–213. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 03.05.2025

Принята к публикации / Accepted 28.05.2025