

Метод фазоспектральной эллипсометрии для неразрушающего контроля химического состава тонких металл-оксидных гетероструктур

Денис Николаевич Тюрин¹✉, Владимир Анатольевич Котенев²

^{1, 2} Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина, РАН, Москва, Россия

¹ipche.ras@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-6726-4703>

²kotenev2006@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема недостаточности точности, информативности и оперативности распознавания структуры и состава неоднородных поверхностных слоёв тонких металл-оксидных гетероструктур при неразрушающем контроле спектральными оптическими методами. Отмечено, что имеющиеся в настоящее время методы исследования таких слоёв, как правило, носят разрушающий характер. Для повышения точности, информативности и оперативности неразрушающего контроля химического состава тонких металл-оксидных гетероструктур разработан метод фазоспектральной эллипсометрии. В данном методе для определения функции распределения комплексного показателя преломления неоднородного поверхностного слоя по его глубине использованы результаты эллипсометрических измерений отражённого излучения различных длин волн. Для реализации предложенного метода создана схема фазоспектрального эллипсометра с длиной волны в качестве управляющего сигнала канала обратной связи. Метод фазоспектральной эллипсометрии применён при контроле распределения химического состава по глубине тонких металл-оксидных гетероструктур на поверхности стали марки X18H10T, окисленной в условиях низких температур и давлений кислорода. При сравнении полученных результатов с независимыми данными оже-профилирования окисленных образцов установлено, что распределения химического состава по глубине оксида соответствуют независимым оже-данным. Показано, что метод фазоспектральной эллипсометрии позволяет чётко отделить и выявить различные окисленные формы сплава. Представленный метод можно применять при неразрушающем и особенно in-situ исследовании распределения химического состава по глубине сверхтонких неоднородных поверхностных оксидов.

Ключевые слова: спектральная эллипсометрия, спектротомография, окисление металлов, пассивация, неоднородные плёнки

Для цитирования: Тюрин Д. Н., Котенев В. А. Метод фазоспектральной эллипсометрии для неразрушающего контроля химического состава тонких металл-оксидных гетероструктур // Измерительная техника. 2022. № 8. С. 62–67. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-62-67>

Phase-spectral ellipsometry method for non-destructive control of the chemical composition of thin metal-oxide heterostructures

Denis N. Tyurin¹✉, Vladimir A. Kotenev²

^{1, 2} Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ipche.ras@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-6726-4703>

²kotenev2006@yandex.ru

Abstract. The problem of insufficient accuracy, informativeness and efficiency of recognition of the structure and composition of inhomogeneous surface layers of thin metal-oxide heterostructures during non-destructive testing by spectral optical methods is considered. It is noted that the currently available methods of studying such layers, as a rule, are destructive in nature. To improve the accuracy, informativeness and efficiency of non-destructive testing of the chemical composition of thin metal-oxide heterostructures, a method of phase-spectral ellipsometry has been developed. In this method, the results of ellipsometric measurements of reflected radiation of various wavelengths are used to determine the distribution function of the complex refractive index of an inhomogeneous surface layer along its depth. To implement the proposed method, a phase spectral ellipsometer circuit with a wavelength as a control signal of the feedback channel has been created. The method of phase-spectral ellipsometry is used to control the distribution of chemical composition over the depth of thin metal-oxide heterostructures on the surface of stainless steel Cr18-Ni10-Ti, oxidized at low temperatures and oxygen pressures. When comparing the obtained results with independent auger profiling data of oxidized samples, it was found that the distribution of the chemical composition over the depth of the oxide corresponds to independent Auger data. It is shown that the method of phase spectral ellipsometry makes it possible to clearly separate and identify various oxidized forms of the alloy. The presented method can be used for non-destructive and especially in-situ study of the distribution of chemical composition over the depth of ultrathin inhomogeneous surface oxides.

Keywords: oxidation of metals, passivation, non-uniform film, spectral ellipsometry, spectrotomography

Введение. Большинство встречающихся при физико-химических исследованиях тонких (по сравнению с длиной

волны зондирующего излучения) поверхностных слоёв на металлах и сплавах обладают неоднородностью

физико-химических (состав, структура), а поэтому и оптических свойств, проявляющихся преимущественно в глубине неоднородного слоя. Особый интерес представляют полупроводниковые металл-оксидные гетероструктуры, широко используемые в микро- и особенно нанoeлектронике. При этом одной из наиболее традиционных задач является неразрушающая идентификация и распознавание структуры и состава по глубине таких неоднородных поверхностных слоёв [1–3].

Существующие спектральные оптические системы исследования поверхности, работающие в режиме регистрации спектров рассеянного и отражённого поверхностно зондирующего излучения, как правило, не всегда обеспечивают удовлетворительные точность, оперативность и информативность измерений, достаточные для решения данной задачи. По спектрам отражения, полученным на стандартных спектрофотометрах, можно лишь качественно судить о существовании на поверхности тонкого слоя известного (по контрольным спектрам) типа, при этом редко изучают поляризационный состав зеркальной компоненты отражённого излучения.

Исключение составляет метод спектральной эллипсометрии, в котором необходимо исследовать эллипсометрические параметры отражённого излучения на каждой фиксированной длине волны спектрального состава излучения. Авторы настоящей статьи используют термин «эллипсометрические параметры» вместо равнозначного, но гораздо менее употребительного в работах по эллипсометрии термина «эллипсометрические углы» [3]. Для восстановления функции распределения показателя преломления слоя по его глубине предложен метод эллипсометрической спектотомографии [4], при этом для определения требуемой функции распределения комплексного показателя преломления неоднородного поверхностного слоя по его глубине [5] используют результаты эллипсометрических измерений отражённого излучения на различных длинах волн.

Цель настоящей работы – представить методические и приборные аспекты метода фазоспектральной эллипсометрии применительно к практике неразрушающего контроля неоднородных по глубине тонких металл-оксидных гетероструктур.

Конструкция и принцип работы фазоспектрального эллипсометра. Для решения поставленной задачи разработана схема фазоспектрального эллипсометра с длиной волны в качестве управляющего сигнала канала обратной связи (рис. 1). Пучок монохроматического излучения, сформированный осветителем 1 (мощностью 200 Вт) и монохроматором МДР-4 2 с линзовой системой, проходит через кварцевый поляризатор 3 и фазовый электрооптический модулятор МЛ-3 4. Электрооптический модулятор на основе электрооптического эффекта в кристалле метаниобата лития возбуждается генератором 5. После модулятора излучение падает на образец – исследуемую систему 8, представляющую собой металлическую подложку с исследуемым тонким оксидным слоем. Образец расположен в камере 6 с оптическими окнами. Камера оснащена системой

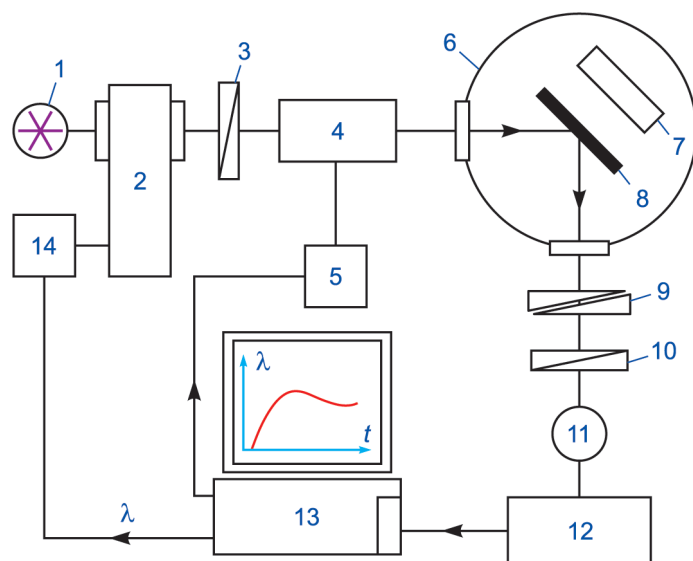


Рис. 1. Оптическая схема фазоспектрального эллипсометра: 1 – осветитель; 2 – монохроматор; 3, 10 – кварцевые поляризаторы; 4 – фазовый электрооптический модулятор; 5 – генератор; 6 – вакуумная камера с оптическими окнами; 7 – система термостатирования; 8 – исследуемый образец; 9 – компенсатор Бабинье-Солейля; 11 – фотоумножитель; 12 – усилитель; 13 – компьютер; 14 – блок управления монохроматором

Fig. 1. Optical scheme of the phase-spectral ellipsometer: 1 – illuminator; 2 – monochromator; 3, 10 – quartz polarizer; 4 – phase electro-optical modulator; 5 – generator; 6 – vacuum chamber with optical windows; 7 – temperature control system; 8 – the sample under investigation; 9 – Babinet-Soleil compensator; 11 – photomultiplier; 12 – amplifier; 13 – computer; 14 – monochromator control unit

термостатирования 7 от комнатной до высокой (600 °C) температуры, предусмотрена возможность контролируемого вакуумирования. Отражённое от образца излучение проходит через фазосдвигающее устройство 9 (компенсатор Бабинье-Солейля) и кварцевый поляризатор 10 в фотоумножитель 11, снабжённый блоком питания. Выделенные на выходе фотоумножителя переменные составляющие сигнала усиливаются с помощью усилителя 12 и поступают в эллипсометрический интерфейс компьютера 13. Плата эллипсометрического интерфейса включает программируемый спектроанализатор на основе RISC-процессора (reduced instruction set computer), выделяющий гармоники частоты модуляции выходного сигнала, и аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователи (АЦП-ЦАП). Блок управления 14 развёртки монохроматора соединён с выходом ЦАП платы (канал обратной связи). Ориентация оптических осей поляризующих элементов относительно азимута плоскости падения следующая: азимуты поляризатора и анализатора 45°, азимуты оптической оси модулятора и главной оси фазосдвигающего устройства 0°. При заданной ориентации оптических элементов интенсивности первой I_{ω} и второй $I_{2\omega}$ гармоник выходного сигнала после фотоприёмника имеют вид соответственно [6]:

$$\left. \begin{aligned} I_{\omega} &= I_0 \frac{S J_1(A) \sqrt{1-K^2}}{1 + C J_0(A) \sqrt{1-K^2}}; \\ I_{2\omega} &= I_0 \frac{C J_1(A) \sqrt{1-K^2}}{1 + C J_0(A) \sqrt{1-K^2}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где I_0 – коэффициент пропорциональности, зависящий от интенсивности света, но не зависящий от параметров исследуемой границы раздела; $S = \sin(\Delta + \alpha)$; $C = \cos(\Delta + \alpha)$; $K = (1 - \tan^2 \psi) / (1 + \tan^2 \psi)$; $J_0(A)$, $J_1(A)$, $J_2(A)$ – функции Бесселя соответствующих порядков; A – амплитуда модуляции; Δ , ψ – фазовый и амплитудный [3] эллипсометрические параметры исследуемой поверхности металла со слоем; α – сдвиг фаз, вносимый фазосдвигающим устройством.

Регистрируемый выходной сигнал Y определяется из (1) как отношение

$$Y = \frac{I_{\omega}}{I_{2\omega}} = \tan(\Delta + \alpha) \beta \frac{J_1(A)}{J_2(A)}, \quad (2)$$

где β – постоянная, не зависящая от интенсивности падающего излучения, фазового параметра Δ и длины волны λ .

Величину $\beta J_1(A) J_2^{-1}(A)$ можно определить из калибровочного эксперимента: если задать известное значение α , то по отношению интенсивностей $I_{\omega}/I_{2\omega}$ можно найти Δ , затем из (1) определить K и далее – ψ .

Из выражения (2) следует независимость регистрируемого сигнала от интенсивности падающего излучения, что обуславливает высокую помехозащищённость системы: в соответствии с (2) любые случайные изменения и флуктуации интенсивности света будут устраняться при делении гармоник.

Если общая толщина неоднородного поверхностного оксидного слоя на стали намного меньше длины волны зондирующего излучения, можно использовать линейное приближение основного уравнения эллипсометрии для неоднородной системы слоёв, моделирующей неоднородный поверхностный, например оксидный, слой [7]:

$$\frac{\tan \psi(\lambda)}{\tan \bar{\psi}(\lambda)} e^{i\delta\Delta(\lambda)} - 1 \cong \frac{4\pi n_a \cos \varphi}{\lambda} \sum_{j=1}^N \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_j} \frac{\varepsilon_j - \varepsilon_s}{\varepsilon_a - \varepsilon_s} \frac{\varepsilon_j - \varepsilon_a}{\varepsilon_s \cot^2 \varphi - \varepsilon_a} d_j, \quad (3)$$

где $\delta\Delta(\lambda) = \Delta(\lambda) - \bar{\Delta}(\lambda)$ – изменение сдвига фаз между ортогонально поляризованными компонентами отражённого излучения при увеличении неоднородного поверхностного слоя; $\Delta(\lambda)$, $\psi(\lambda)$ – фазовый и амплитудный эллипсометрические параметры исследуемой поверхности с неоднородным слоем; $\bar{\Delta}(\lambda)$, $\bar{\psi}(\lambda)$ – фазовый и амплитудный эллипсометрические параметры поверхности образца без системы слоёв (до окисления); φ – угол падения зондирующего излучения на исследуемую поверхность; n_a , ε_a – показатель преломления и диэлектрическая проницаемость окружающей среды; $\varepsilon_a = n_a^2$; $\varepsilon_s(\lambda)$ – диэлектрическая проницаемость подложки; $\varepsilon_j(\lambda)$, d_j – диэлектрическая проницаемость и искомая толщина j -го слоя; N – число слоёв, моделирующих неоднородный поверхностный слой.

Параметры $\bar{\Delta}(\lambda)$, $\bar{\psi}(\lambda)$, $\varepsilon_s(\lambda)$ определяются по результатам контрольных спектральных рефлектометрических измерений на исходной поверхности подложки.

С учётом уравнения (2) имеем

$$Y(\lambda) = g(\lambda) \tan[\Delta(\lambda) + \alpha/\lambda], \quad (4)$$

где $g(\lambda) = \beta(\lambda) J_1[A(\lambda)] J_2^{-1}[A(\lambda)]$.

На исходной поверхности стального образца до начала процесса окисления металла с помощью компенсатора изменяют значение α и подстраивают отношение α/λ так, чтобы соблюдалось равенство $Y = 0$ и, следовательно, $\bar{\Delta} = -\alpha/\lambda$. Данную процедуру проводят на каждой длине волны λ_j излучения монохроматора. При этом регистрируется зависимость $\alpha(\lambda_j) = \alpha_j$, соответствующая выполнению условия $Y = 0$. Затем «запускается» процесс окисления образца, и выходной сигнал принимает вид

$$Y(\lambda_j) = g(\lambda_j) \tan[\bar{\Delta}(\lambda_j) - \delta\Delta(\lambda_j) + \alpha_j/\lambda_j], \quad (5)$$

где $\delta\Delta(\lambda_j)$ описано уравнением (3). В каждый момент времени t через цепь обратной связи (см. рис. 1) длина волны монохроматора λ_j подстраивается так, что в каждый момент соблюдается равенство $Y[\lambda_j(t)] = 0$, где $\lambda_j(t)$ – кинетика изменения длины волны зондирующего излучения от времени t окисления образца в j -й спектральной области, соответствующей занулению Y в каждой j -й области длин волн. В отличие от обычных спектральных эллипсометров, в которых регистрируются эллипсометрические параметры на каждой фиксированной длине волны, в представленном приборе регистрируются сдвиги длины волны в узких спектральных областях, соответствующие занулению отношения выделенных гармоник (частоты модуляции) фотоприёмника прибора (см. (2)). При этом рабочий диапазон длин волн монохроматора разбивают на N узких спектральных областей в окрестности дискретных длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_N$, отстоящих друг от друга на величину, существенно большую чем ожидаемое максимальное значение кинетики $\delta\lambda_j(t)$ подстройки длины волны в j -й узкой спектральной области для каждой длины волны. Данное условие с гарантией удовлетворяется для тонких по сравнению с длиной волны слоёв. Регистрация $\delta\lambda_j(t)$ производится в каждой j -й области длин волн, $j = 1, 2, \dots, N$. Таким образом можно получить зависимость $\delta\lambda_j(t)$ для всех j областей. Уравнение (5) реализуется при условии $\bar{\Delta}[\lambda_j(t)] - \delta\Delta[\lambda_j(t)] + \alpha_j/\lambda_j(t) = 0$, из этого условия в каждый момент времени можно найти

$$\delta\Delta[\lambda_j(t)] = \bar{\Delta}[\lambda_j(t)] + \alpha_j/\lambda_j(t). \quad (6)$$

В случае линейной аппроксимации, когда толщина неоднородного поверхностного слоя намного меньше длины волны, справедливо $\delta\Delta \ll \Delta$, поэтому $\delta\lambda \ll \lambda$. Тогда можно предположить, что дисперсия оптических свойств

неоднородного слоя в каждой из N узких спектральных областях $\delta\lambda$ слаба, и можно использовать приближение независимости оптических свойств подложки и подслоёв неоднородного поверхностного слоя (оксида) от длины волны зондирующего излучения в узких спектральных областях подстройки длины волны. Поскольку перед измерениями значение α подстраивали по условию $\bar{\Delta} = -\alpha/\lambda(t=0)$, то уравнение (6) можно разложить в ряд Тейлора в окрестности $t=0$ и получить

$$\delta\Delta[\lambda_j(t)] \cong -\alpha_j \delta\lambda_j(t)/\lambda_j^2(t=0). \quad (7)$$

Таким образом, определив $\delta\lambda_j(t)$, можно зарегистрировать изменение сдвига фаз $\delta\Delta(\lambda_j)$ между ортогонально поляризованными компонентами излучения в каждой узкой j -й спектральной области в ходе окисления образца.

Метод определения распределения химического состава по глубине неоднородных поверхностных слоёв тонких металл-оксидных гетероструктур по данным фазоспектральной эллипсометрии. Из полученных N значений сдвигов фаз (на N длинах волн) для каждого момента времени можно рассчитать толщину каждого из N субслоёв в неоднородном поверхностном оксиде (например, формально решая систему N уравнений (2) с N неизвестными толщинами субслоёв). Для получения устойчивых решений можно применить метод квазиразностей [8]. Из измеренных значений $\delta\Delta[\lambda_j(t)]$ и известных спектров $\varepsilon_s(\lambda_j)$, $\varepsilon_f(\lambda_j)$ первоначально на основании уравнения (3) строится функционал

$$F(\lambda_j, d_1, d_2, \dots, d_N) = [\delta\Delta(\lambda_j, d_1, d_2, \dots, d_N) - \delta\Delta_{\text{exp}}(\lambda_j)]^2,$$

где $\delta\Delta(\lambda_j, d_1, d_2, \dots, d_N)$ – известная функция, определённая из (2); $\delta\Delta_{\text{exp}}(\lambda_j)$ экспериментально найдена по уравнению (6).

Далее строится суммарная функция отклонения по всему оптическому спектру

$$S(d_1, d_2, \dots, d_N) = \sum_{j=1}^N F(\lambda_j), \quad (8)$$

получившийся функционал $S(d_1, d_2, \dots, d_N)$ минимизируется по $d_1, d_2, \dots, d_N$ как по параметрам. Получившиеся значения толщин $d_1, d_2, \dots, d_N$ соответствуют наилучшему приближению принятой линейно-аппроксимационной модели по уравнению (3) к реальному неоднородному оксиду и поэтому в рамках данной модели отражают реальное соотношение толщин оксидов в неоднородном поверхностном оксиде. Точность метода при использовании оптимизационного алгоритма по уравнению (8) можно повысить, если количество областей, на которые разбивают рабочий диапазон длин волн монохроматора, существенно больше N .

Эксперимент. Предложенный выше метод фазоспектральной эллипсометрии использован для исследования низкотемпературного вакуумного окисления нержавеющей стали марки X18H10T (многокомпонентного сплава на основе железа). Неоднородность окисленного поверхностного слоя сплава проявляется в изменяющемся по глубине

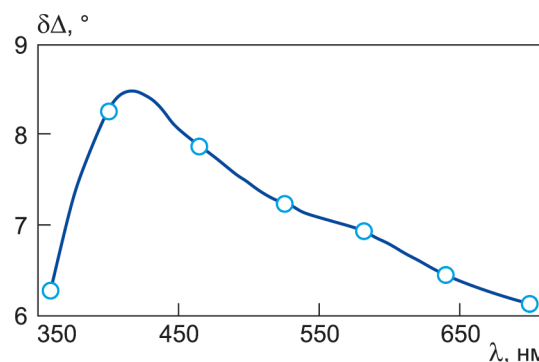


Рис. 2. Сглаженный спектр изменения $\delta\Delta(\lambda_j)$ эллипсометрического параметра после 1 ч окисления стали марки X18H10T (2,66 Па, 300 °C) по сравнению с исходной поверхностью стали

Fig. 2. Smoothed spectrum of change $\delta\Delta(\lambda_j)$ of the ellipsometric parameter after 1 h oxidation of stainless steel (1.33 Pa, 300 °C) compared to the initial steel surface

оксида объёмном соотношении оксидов железа и хрома с существенно различающимися оптическими параметрами. С точки зрения оптических параметров данное ограничение только двумя простыми оксидами термодинамически обусловлено выбранными условиями окислирования (температурой и парциальным давлением кислорода в вакуумной камере) [9, 10].

Зеркально отполированный образец стали марки X18H10T промывали дистиллированной водой, спиртом, высушивали, вносили в вакуумную камеру, оснащённую печкой. Окисление образца в течение 1 ч при низком парциальном давлении кислорода в области активно-пассивного перехода сплава Fe-18Cr (давление в вакуумной камере 1,33 Па, температура образца 300 °C) проводили по методике, описанной в [11].

Результаты и обсуждение. На рис. 2 приведён сглаженный спектр изменения $\delta\Delta[\lambda_j(t)]$ после окисления образца в течение 1 ч (при указанных выше давлении и температуре). При этом полный спектральный диапазон 340–700 нм разбивался на шесть спектральных подобластей, как описано выше.

Шаг дискретизации полученных спектров эллипсометрических параметров (разбиение на спектральные подобласти) составлял 60 нм. Поиск $d = (d_1, d_2, \dots, d_N)$ соответствовал поиску толщин шести подслоёв неоднородного слоя, в каждом из которых объёмная доля оксидов железа имела определённое значение в интервале $\theta = 0 \dots 1$ с шагом 0,2. Оптические параметры j -го подслоя записывали в рамках модели эффективной среды [3, 12]. Спектры оптических параметров индивидуальных оксидов железа и хрома взяты из [13–15]. При этом априорно полагали, что при «движении» в глубину оксида объёмное содержание оксидов хрома увеличивается, а оксидов железа уменьшается [10, 16], что позволяло помимо повышения устойчивости решения также обеспечить возможность восстановления распределения содержания оксидов по глубине неоднородного оксида

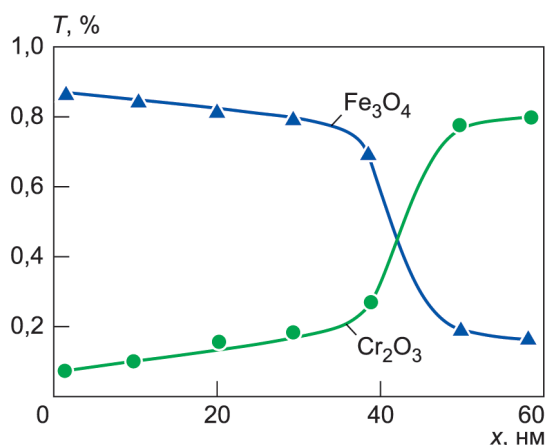


Рис. 3. Рассчитанные распределения содержания T оксидов железа и хрома по глубине x неоднородного поверхностного оксида, полученные после 1 ч окисления при 1,33 Па, 300 °С

Fig. 3. The calculated profiles of the volume content T of chromium oxides and iron oxides in an inhomogeneous surface oxide: obtained after 1 h of oxidation (1.33 Pa) at 300 °C; x – is the “in depth” coordinate of the oxide

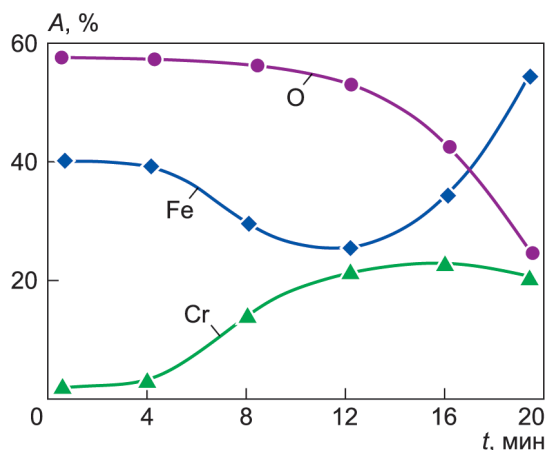


Рис. 4. Оже-профили содержания A элементов (кислорода, хрома и железа) в неоднородном поверхностном оксиде, полученные после окисления 1 ч при 1,33 Па, 300 °С; t – время травления аргоновым пучком

Fig. 4. Auger profiles of the content A of elements (oxygen, chromium and iron) in an inhomogeneous surface oxide: obtained after 1 hour of oxidation (1.33 Pa) at 300 °C; t – is the argon beam etching time

по значениям $d_1, \dots, d_N$. Соответствующие рассчитанные по полученным спектрам сглаженные распределения оксидов железа и хрома по глубине оксида приведены на рис. 3.

Для независимого контроля результатов фазоспектральной эллипсометрии элементный состав полученной оксидной плёнки исследовали также методом оже-спектроскопии в сочетании с аргоновым травлением оксидного слоя [17]. Для контроля распределения металлических компонентов сплава и кислорода по глубине оксидного слоя использовали оже-пики хрома 526 эВ, железа 650 эВ и кислорода 510 эВ.

На основе исследования химических сдвигов интенсивностей данных оже-пики в спектре для различных времён аргонового травления установлено, что нагрев сплава приводит к неравномерному распределению окисленных форм атомов железа и хрома по глубине оксидного слоя.

На рис. 4 приведены распределения элементов по глубине оксида на окисленном образце. Расчётные данные фазоспектральной эллипсометрии соответствуют данным оже-профилирования. Несовпадение оже-профилей при приближении к подложке (при $t=20$ мин) связано с тем, что на оже-спектр оксида начинает накладываться спектр подложки. Рассмотренный в данной работе метод фазоспектральной эллипсометрии лишён описанного недостатка метода оже-спектроскопии и позволяет чётко отделить и выявить окисленные формы сплава. Распределение компонентов сплава по глубине оксида примерно соответствует тангенциальному распределению окисленных форм атомов железа и хрома вдоль поверхности сплава при тангенциальном наложении тока на окислируемый одномерный проводник, ранее полученному в работе [18].

Заключение. Имеющиеся в настоящее время методы исследования сверхтонких неоднородных поверхностных, например оксидных, слоёв, как правило, носят разрушающий характер. Представленный метод фазоспектральной эллипсометрии можно использовать при неразрушающем и особенно in-situ исследовании химического состава сверхтонких неоднородных поверхностных оксидов.

Список источников/References

1. Paolo Mele, Tamio Endo, Shunichi Arisawa, Chaoyang Li, Tetsuo Tsuchiya, *Oxide Thin Films, Multilayer, and Nanocomposites*, Springer Int. Publ., Switzerland, 2015, 316 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14478-8>
2. Losurdo M., *Ellipsometry at the nanoscale*, ed. M. Losurdo, K. Hingerl, Berlin, Heidelberg, Springer, 2013, 730 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33956-1>
3. Azzam Rasheed M., Bashara Nicholas M., *Ellipsometry and Polarized Light*, North Holland; 3rd reprint 1999 edition, 558 p.
4. Kotenev V. A., *Proc. SPIE, Analytical Methods for Optical Tomography*, 1992, vol. 1843. <https://doi.org/10.1117/12.131899>
5. Тюрин Д. Н., Котенев В. А., Цивадзе А. Ю. Метод спектрально-эллипсометрической оценки фазового состава многослойных плёнок и металл-оксидных структур в процессе их роста // Измерительная техника. 2019. № 11. С. 62–67. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-11-62-67> [Tyurin D. N., Kotenev V. A., Tsivadze A. Y., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 62, no. 11, pp. 996–1002. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01724-0>].
6. Jaspersen S. N., Schnatterly S. E., *Rev. Sci. Instr.*, 1969, vol. 40, no. 6, pp. 761–767. <https://doi.org/10.1063/1.1684062>
7. O'Hunderi, *Surface Science*, 1976, vol. 61, no. 2, pp. 515–520. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(76\)90063-7](https://doi.org/10.1016/0039-6028(76)90063-7)
8. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука. 1986. 287 с. [Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya.,

Metody resheniya nekorrektnykh zadach, Moscow, Nauka Publ., 1986, 287 p. (In Russ.).

9. Kotenev V. A., *Protection of Metals*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 301–310. <https://doi.org/10.1023/A:1024926927108>

10. Окисление металлов / Под ред. Бенара Ж. М.: Металлургия, 1968. Т. 2. 448 с. [Oxydation des Metaux, ed. Benard J., Paris, Gauthier-Villars, 1962, V. 2].

11. Kotenev V. A., *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2021, vol. 57, no. 6, pp. 1150–1158. <http://dx.doi.org/10.1134/s2070205121060137>

12. O'Hunderi, *Surface Science*, 1980, vol. 96, pp. 1–31. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(80\)90291-5](https://doi.org/10.1016/0039-6028(80)90291-5)

13. Tanaka T., *Jap. J. Applied Physics*, 1979, vol. 18, no. 6, 1043. <https://doi.org/10.1143/JJAP.18.1043>

14. Idczak E., Oleszkiewicz E., *Thin Solid Films*, 1981, vol. 77, no. 4, pp. 301–303. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(81\)90321-7](https://doi.org/10.1016/0040-6090(81)90321-7)

15. Винчелл А. Н., Винчелл Г. В. Оптические свойства искусственных минералов: Пер. с англ. Н. Н. Курцевой и Н. И. Овсянниковой / Под ред. и с предисл. д. геол.-минерал. наук В. В. Лапина. М.: Мир, 1967. С. 98 [Winchell A. N., Winchell H., *Optical Properties of Artificial Minerals*, New York, Academic, 1964].

16. Greyling C. J., Roux J. P., *Corrosion Science*, 1984, vol. 24, no. 8, p. 675. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(84\)90058-1](https://doi.org/10.1016/0010-938X(84)90058-1)

17. Венер Г., Лухтман Д., Бак Т. и др. Методы анализа поверхностей / Под ред. А. Зандерны. Пер. с англ. под ред. [и с предисл.] В. В. Кораблева, Н. Н. Петрова. М.: Мир, 1979. 582 с. [Von A. W. Czanderna, *Methods of Surface Analysis*, Bd. 1, Elsevier Scientific Publishing Comp., Amsterdam, Oxford, New York, 1975. <https://doi.org/10.1002/CITE.330480539>].

18. Kotenev V. A., *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 1097–1104. <https://doi.org/10.1134/S2070205121050142>

Статья поступила в редакцию 03.03.2022; одобрена после рецензирования 01.06.2022; принята к публикации 02.06.2022.
The article was submitted 03.03.2022; approved after reviewing 01.06.2022; accepted for publication 02.06.2022.