

УДК 544

ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКАЯ СПЕКТРОТОМОГРАФИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ-АБСОРБЕРОВ ГЕЛИОУСТАНОВОК СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

© 2024 г. В. А. Котенев^{а, *}, Д. Н. Тюрин^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН
Ленинский пр., 31, корп. 4, Москва, 119071 Россия

*e-mail: m-protect@mail.ru

Поступила в редакцию 14.12.2023 г.

После доработки 29.10.2024 г.

Принята к публикации 04.12.2024 г.

Представлены методические основы спектральной эллипсометрической томографии для неразрушающего контроля и дальнейшей классификации структуры и состава многослойных пленок, пленочных наноструктур и нанокомпозитов в процессе их роста, используемых при построении новых типов оптических поглощающих покрытий солнечных коллекторов. Полученные на различных длинах волн эллипсометрические параметры позволяют определить распределение комплексного показателя преломления по глубине пленки. Данные Раман-спектроскопии позволяют получить дополнительную информацию по морфологии и фазовому составу многослойной пленки. На основе полученных данных производится классификация структуры, состава и отсюда теплофизических свойств многослойных пленок. Это позволяет на основании отдельной обучающей выборки рассчитать поглощение солнечного излучения в поглощающем покрытии на всех стадиях его роста и отсюда спрогнозировать температурный режим коллектора гелиоустановки.

Ключевые слова: спектральная эллипсометрия, окисление металлов, пассивация, неоднородные пленки, солнечная энергетика, коллекторы и абсорберы оптического излучения

DOI: 10.31857/S0044185624060098, EDN: MPCROI

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные селективные поверхности обычно ассоциируются с плоскими металлическими коллекторами, нагревающими воду и воздух для отопления зданий или горячего водоснабжения. Особые оптические покрытия превращают внешнюю плоскость коллекторов в селективную поверхность, черную по отношению к падающей солнечной радиации и белую (обладающую малой степенью черноты) в инфракрасной области собственного теплового излучения коллектора [1].

В установках солнечной энергетики происходит концентрирование солнечной энергии на поглощающем солнечное излучение приемнике — коллекторе. Солнечное излучение по-

глощается коллектором, нагревает его и используется для нагрева теплоносителя (воды, пара и др.) и, далее, приведения в действие электрогенератора паровой турбины для выработки электроэнергии. Чтобы максимально увеличить количество поглощаемого света, коллектор покрыт пленочным материалом или слоем регулярной шероховатости, который может интенсифицировать поглощение и перенос как можно большего количества солнечной энергии в коллектор [1–3]. При этом солнечный спектрально-селективный поглощающий коллектор должен обладать высокой поглощающей способностью (α) в диапазоне длин волн 300–2500 нм и низким коэффициентом излучения (ϵ) ($\lambda \approx 2,5$ мкм) в инфракрасной области при высокой рабочей температуре. Оптические селективные покры-

тия позволяют значительно уменьшить тепловые потери в окружающую среду. Эти покрытия, используемые при преобразовании солнечной энергии, полезны не только как средство повышения эффективности плоских тепловых коллекторов солнечного излучения. С их помощью можно также увеличить КПД полупроводниковых солнечных элементов благодаря эффекту просветления светопоглощающей поверхности, защитить элементы от воздействия корпускулярной радиации, отразить нефотоактивное излучение Солнца, увеличить степень черноты и уменьшить тем самым равновесную рабочую температуру солнечных батарей [1].

В последние годы разработчики сосредоточились на получении покрытий на поверхности солнечных коллекторов, эффективно поглощающих солнечную энергию. Были разработаны соответствующие технологии, (например, пиролиз, золь-гель технологии, оксидирование и др.), позволяющие получать сильно поглощающие материалы и покрытия для различных видов подложек и материалов [4–8]. В этой связи особый практический интерес представляют многослойные спектрально-селективные покрытия, использующиеся в поглощающих солнечный свет коллекторах, и подобных оптических элементах установок солнечной энергетики [9]. Разработка многослойных и в общем случае градиентных покрытий с высокими значениями коэффициентов поглощения позволяет значительно повысить КПД солнечно-энергетических установок.

Одним из методов получения металл-оксидных спектрально-селективных покрытий коллекторов солнечного излучения является высокотемпературное окисление либо самого модифицируемого металла или сплава коллектора (в том числе в условиях контролируемой атмосферы), одного или нескольких слоев иностранного металла или неметалла, предварительно нанесенных на подложку модифицируемого металла [9], либо композиционного материала, полученного, путем введения металлического или металл-оксидного дисперсного наполнителя в матрицу (например, полимерную) модифицируемого материала [10]. Получаемые здесь пленки представляют собой уникальные микро- и наноструктурные спектрально-селективные оптические объекты. Они могут создаваться как в виде систем поликристаллических или аморфных слоев, так и многофазных поверхностных структур, больше напоминающих переходную приповерхностную область, чем индивидуальную химическую фазу [11–13].

Очевидно, разработка новых производительных методов для контроля и управления процессами формирования и функционирования таких материалов и покрытий в реальных условиях окружающей среды, особенно при повышенных температурах, влажности и составе агрессивных компонентов атмосферы, крайне важна в практике солнечной энергетики [14].

Интеллектуальные информационные системы (ИИС), предназначенные для реконструкции внутреннего строения многослойных пленок и покрытий, основанные на применении методов искусственного интеллекта при обработке данных оптической спектроскопии и микроскопии представляют в области “солнечного” материаловедения несомненный интерес. Особо перспективным в этой связи является использование в ИИС алгоритмов, позволяющих проводить цифровую обработку “зашумленных” оптических спектров и слабоконтрастных микроскопических изображений многослойных сильно поглощающих слоев [15, 16]. Такие алгоритмы обычно используют обучающую информацию, полученную поиском в заданной исследователем предметной области. Для реконструкции внутреннего строения и состава многослойных покрытий в таких системах все чаще используются методы спектральной томографии [17] – спектротомографической обработки эллипсометрических параметров при различных длинах волн зондирующего излучения и последующего решения обратной задачи реконструкции типа интегрального уравнения Фредгольма 1 рода. Поскольку такие обратные задачи для решения требуют оптимизации по ограниченному набору исследуемых параметров системы, при этом решаются классические ИИС-задачи распознавания образов. В качестве наиболее подходящего метода, где обработка спектрально-рефлектометрической информации начинается в поляризационно-оптическом тракте прибора, можно использовать метод спектральной Фурье-эллипсометрии [18].

В работе [19] ранее были представлены методические принципы построения метода и измерительной микроскопической системы поляризационной отражательной спектроскопии околонормального падения излучения для бесконтактного неразрушающего контроля многослойных металл-оксидных слоев на сплавах Fe-Cr, используемых при построении новых типов оптических поглощающих покрытий солнечных коллекторов. К сожалению, разработанный спектрорефлектометрический метод не облада-

ет достаточным разрешением восстановления внутренней структуры и состава оптических покрытий по их глубине.

Очевидно, разработка чувствительных методов спектральной эллипсометрической томографии при построении ИИС контроля многослойных оптических покрытий представляет несомненный интерес при решении задач синтеза новых оптических покрытий коллекторов, а также контроля качества подобных систем особенно при сильных вариациях условий (температура, влажность, агрессивные компоненты атмосферы и др.) окружающей среды, приводящих к деградации материалов коллекторов и покрытий.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Для решения поставленной задачи первоначально необходимо наиболее полно оценить фазовый состав оксидного. Для этого можно воспользоваться термодинамическими диаграммами состояния металл-газ [20]. Источником априорной и дополнительной информации по фазовому составу являются методы оптической спектроскопии, оптимально комбинируемые с методами спектральной эллипсометрии.

Определив все возможные фазы, далее по справочным данным [21, 22], либо методами моделирования оптических свойств [23–25] определяются спектры комплексных показателей преломления $N_j(\lambda)$ всех фаз.

Рассмотрим многослойную систему на рис.1, где $N_a = N_0$ – комплексный показатель преломления окружающей среды, $N_s = N_{m+1}$ – ком-

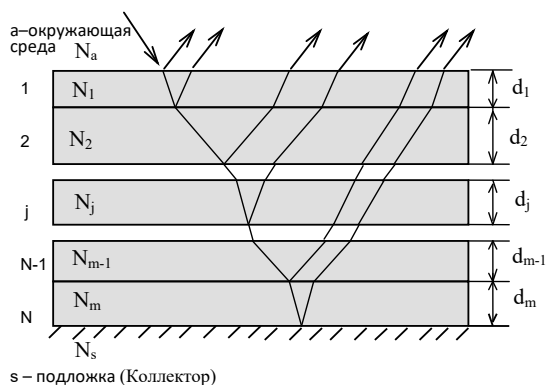


Рис. 1. Оптическая модель неоднородного оксидного слоя на коллекторе: а – окружающая среда, s – подложка (металл коллектор), m – общее количество подслоев, d – толщина j – го подслоя, N_j – комплексный показатель преломления j-го подслоя.

плексный показатель преломления подложки, ϕ_a – угол падения зондирующего излучения на неоднородный слой, d_j , $N_j(\lambda)$ – толщина и комплексный показатель преломления j-ой фазы-подслоя, m – общее число подслоев. Отражение и прохождение излучения определяются матрицей рассеяния S_v , ($v = p, s$) многослойной системы соответственно для s- и p – поляризаций зондирующего излучения [24]:

$$S_v = I_{01v} L_1 I_{12v} L_2 \dots I_{(j-1)jv} L_j \dots L_m I_{m(m+1)v} \quad (1)$$

$$I_{ijv} = \begin{pmatrix} 1 & r_{ijv} \\ r_{ijv} & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

– матрица рассеяния i-j – границы раздела для v поляризации, r_{ijv} – соответствующий френелевский коэффициент отражения данной границы раздела:

$$r_{ijp} = (N_j^2 e_i - N_i^2 e_j) / (N_j^2 e_i + N_i^2 e_j) \quad (3)$$

$$r_{ijs} = (e_i - e_j) / (e_i + e_j) \quad (4)$$

$$e_j = (N_j^2 - N_a^2 \sin^2 \phi_a)^{1/2} \quad (5)$$

L_i – независимая от поляризации матрица рассеяния i – го подслоя, где:

$$L_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & X_i \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$X_i = \exp[-4\pi \sqrt{-1} (d_i / \lambda) e_i]. \quad (7)$$

Комплексные амплитудные коэффициенты отражения от всей многослойной структуры даются отношением элементов матрицы рассеяния:

$$R_v = S_{21v} / S_{11v}, \quad v = p, s \quad (8)$$

Отсюда можно записать основное уравнение эллипсометрии, связывающее эллипсометрические параметры Δ , ψ с R_p , R_s :

$$\operatorname{tg} \psi \cdot e^{i\Delta} = R_p / R_s \quad (9)$$

Уравнения (1)-(9) являются основой для неразрушающего восстановления структурных и фазовых неоднородностей внутреннего строения неоднородных поверхностных слоев. Таким образом, проводя спектральные измерения $\Delta(\lambda)$, $\psi(\lambda)$, в достаточно широком спектральном диапазоне ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$) и аппроксимируя неоднородный поверхностный слой m-однородными слоями тол-

щины d_j для каждой длины волны λ_i можно записать основное уравнение эллипсометрии (9):

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \psi(\lambda_1) \cdot e^{i\Delta(\lambda_1)} &= Y(d_1, d_2, \dots, d_m; \lambda_1; \\ &N_1(\lambda_1), N_2(\lambda_1), \dots, N_m(\lambda_1)) \\ \operatorname{tg} \psi(\lambda_2) \cdot e^{i\Delta(\lambda_2)} &= Y(d_1, d_2, \dots, d_m; \lambda_2; \\ &N_1(\lambda_2), N_2(\lambda_2), \dots, N_m(\lambda_2)) \\ &\dots\dots\dots \\ \operatorname{tg} \psi(\lambda_n) \cdot e^{i\Delta(\lambda_n)} &= Y(d_1, d_2, \dots, d_m; \lambda_n; \\ &N_1(\lambda_n), N_2(\lambda_n), \dots, N_m(\lambda_n)) \end{aligned} \quad (10)$$

где $\Delta(\lambda_j), \psi(\lambda_j)$ – спектры эллипсометрических параметров, $\lambda_i - i$ – я длина волны, $N_j(\lambda_k)$ – показатель преломления j – го слоя на длине волны λ_k , $Y = R_p / R_s$ – известная функциональная зависимость определяемая соотношением (9). Для сходимости расчетов, очевидно, должно быть $n \gg m$.

Если оптические параметры слоя известны, т.е. функции $N_j(\lambda_k)$ известны, то систему (10) можно решить численно относительно толщин $d_1, d_2, \dots, d_m$ и таким образом провести контроль и дальнейшую классификацию структуры и состава многослойных пленок.

Система уравнений (10) является классической обратной задачей. На основе регуляризирующих алгоритмов решения некорректных задач [26–28] ее можно “устойчиво” решать даже при большом числе уравнений. Если в отношении ожидаемого решения могут быть сделаны априорные предположения переводящие возможные решения на компакты – ограниченные множества функций, обладающих соответствующими априорными свойствами, то для получения устойчивых решений можно воспользоваться методом квазирешений [28]. При этом для численного определения всех d_j из измеренных экспериментальных значений $\Delta_{\text{exp}}(\lambda_i), \psi_{\text{exp}}(\lambda_i)$ первоначально на основании основного уравнения эллипсометрии (9), записанного для исследуемой поверхностной системы на основании выбранной модели с m – неизвестными параметрами d_j , строится функционал:

$$\begin{aligned} F(\lambda_j, d_1, d_2, \dots, d_m) &= \\ &= [\Delta_j(\lambda_j; d_1, d_2, \dots, d_m) - \Delta_{\text{exp}}(\lambda_j)]^2 + \\ &+ [\psi_j(\lambda_j; d_1, d_2, \dots, d_m) - \psi_{\text{exp}}(\lambda_j)]^2 \end{aligned} \quad (11)$$

где $\Delta_j(\lambda_j; d_1, d_2, \dots, d_m), \psi_j(\lambda_j; d_1, d_2, \dots, d_m)$ – известные функция, определенные из уравнения (10). Если в данном уравнении все неизвестные параметры соответствуют их действительным значениям, то $F(\lambda_j, d_1, d_2, \dots, d_m) = 0$. Далее строится суммарная функция отклонения по всему оптическому спектру:

$$S(d_1, d_2, \dots, d_m) = \sum_{j=1}^n F(\lambda_j) \quad (12)$$

Далее производится минимизация получившегося функционала $S(d_1, d_2, \dots, d_m)$ по толщинам слоев $d_1, d_2, \dots, d_m$ как по параметрам. Соответствующие этому абсолютному минимуму получившиеся значения параметров $d_1, d_2, \dots, d_m$ соответствуют наилучшему приближению принятой модели к реальной контролируемой поверхностной системе. При этом использование для минимизации функционала всего оптического спектра (n – дискретных значений $\Delta_{\text{exp}}(\lambda_i), \psi_{\text{exp}}(\lambda_i)$ на n -дискретных длинах волн λ_i , при $n \gg m$), существенно увеличивает точность расчетов. Для повышения чувствительности и разрешения предусмотрена настройка спектральных диапазонов, “захватывающих” наиболее выраженные особенности полос поглощения фазовых компонентов слоя [29].

Особенностью представленного метода является то, что в отличие от большинства известных работ, в многослойную металл-оксидную модель системы уже изначально “вводятся” все термодинамически возможные фазы-слои, которые могут быть получены при заданных условиях синтеза и эксплуатации покрытия коллектора. Последовательной подгонкой толщин этих фаз (а также их различных комбинаций) находят наилучшее приближение модельных спектров эллипсометрических параметров к измеренным на всех стадиях эксперимента. Получившиеся толщины “выживших” в процессе оптимизации слоев ($d_1, d_2, \dots, d_m$), соответствующих наилучшему приближению по всему спектру для каждого момента времени, решают задачу непрерывного контроля фазового состава многослойной металл-оксидной структуры. При этом объемное содержание в неоднородном оксиде j -й фазы очевидно равно $d_j / (d_1 + d_2 + \dots + d_m)$.

При этом особенностью рассмотренного “профилирования” металл-оксидных структур является наличие априорной термодинамической информации не только о возможных фазах, но и о порядке их чередования в неоднородном поверхностном слое: содержание окислителя в глубину многофазного металл-оксидного слоя

обычно падает, а металлической компоненты — обычно растет.

На основе измеренных спектров эллипсометрических параметров определяется *последний набор толщин и оптических параметров субслоев* для тестируемой многослойной пленки (а именно профиль пленки) и далее в ИИС производится выборка из базы данных объекта с металл-оксидной структурой, наиболее близкой к изучаемому объекту, т.е. производится классификация изучаемой структуры. Поскольку такие обратные задачи для решения требуют оптимизации по ограниченному набору исследуемых параметров системы, при этом решается классическая задача ИИС — распознавание образов.

Конечной задачей разрабатываемой ИИС является определение условий (температура, состав атмосферы, давление окислителя, состояние поверхности и др.), при которых на окисляемой поверхности формируются металл-оксидные многослойные пленки с максимальным поглощением, обеспечивающие максимальный КПД гелиоустановки.

ТЕСТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Достаточно давно [1] были предложены простые методы термического оксидирования железа или низколегированной стали для формирования селективных поглощающих покрытий из окислов железа. Один из них состоит в простом нагревании образца на воздухе в течение 1–2 часов. Спектральная отражательная способность таких покрытий в видимом диапазоне достаточно монотонно, но относительно слабо растет от величины 0.1–0.2 с длиной волны [30]. Эти покрытия менее устойчивы к воздействию атмосферы, чем изготовленные с использованием химических методов оксидирования, однако гораздо более экологичны. Кроме того, чтобы увеличить поглощательную способность покрытий из окислов железа относительно солнечного излучения, было предложено наносить на них органическую полимерную пленку, которая проявляет себя как просветляющее покрытие. При этом, однако, возрастает степень черноты покрытия за счет полос поглощения в ИК-области. Однако воздействие окружающей среда (в основном, влаги) при этом существенно уменьшается.

С целью тестирования разрабатываемой методики были проведены предварительные спектральные эллипсометрические исследования

на толстой пленке напыленного железа, полученного магнетронным осаждением железа в вакууме 10^{-6} Торр на стальной подложке материала коллектора (сталь X18), и далее окисленного в течение 2 часов при температуре 300°C и степенях вакуумирования 10^{-4} – 760 Торр. Измерения проводились на спектральном эллипсометре [18], снабженном монохроматором МДР-4. При расчете толщин субслоев термодинамически возможных магнетита и гематита использовали 3-слойную оптическую модель (рис. 3) (подложка-слой шероховатости-2-многослойный оксидный слой), где оптические параметры слоев определялись в процессе нелинейной оптимизации.

Было показано, что при активированном окислении при степени вакуумирования 0.01 Торр, на поверхности железа начально происходит быстрый рост слоя магнетита Fe_3O_4 и поверх него — гораздо более тонкого слоя гематита. На последующей стадии общая скорость окисления со временем сильно падает (рис. 2,3). Данный эффект очевидно связан с быстрым зарождением, зародышеобразованием, распространением и ростом островков гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ на внешнем слое магнетита. Поверхность, через которую может идти ускоренный рост магнетита, сокращается и сокращается общая скорость окисления. В конце концов тонкая сплошная пленка плотно упакованных кристаллитов $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ блокирует поверхность магнетита и металла от дальнейшего ускоренного окисления.

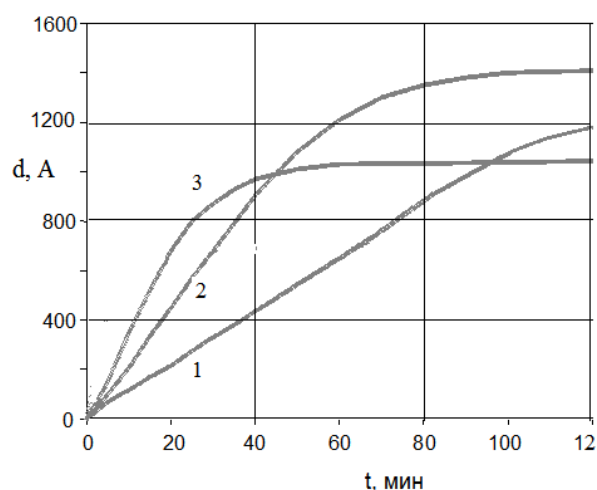


Рис. 2. Изменения толщины оксида D на железе при 300°C и парциальном давлении кислорода в системе P: 1 — 0.001 Торр, 2 — 0.01 Торр, 3 — 0.1 Торр.

Существенно, что через промежуток от 30 до 60 мин. (промежуток падает с ростом давления в камере) регистрируется слабое падение толщины гематита (рис. 3), очевидно связанное с реакцией его восстановления до магнетита на внутренней границе магнетит-гематит, принципиальная значимость которой для процессов как низкотемпературного газового окисления железа [31, 32], так и для работы металл-оксидных коллекторов на основе RedOX — процессов и взаимной трансформации различных фаз оксидов металлов может быть достаточно велика. Полученное толстое магнетитовое покрытие носит название “черного железа”. Коэффициент поглощения полученного покрытия достигает в видимом диапазоне величины 0.9.

Структура и состав оксидного слоя, образующегося на поверхности вакуумно осажденного железа определяются температурой окисления и давлением окислительной среды. Для железа при относительно низкой температуре 300°C средняя скорость окислирования железа при достижении и росте давления кислорода в вакуумной камере выше определенной величины (10^{-2} мм рт. ст.) начинает падать (рис. 2), что формально является проявлением низкотемпературной пассивности.

Очевидно, при необходимости получить при низкотемпературном окислении железа магнетитовый слой “черного железа” максимальной толщины (порядка 1500–2000 Å при 300°C), необходимо вести окислирование в области давлений низкотемпературной пассивности. Следует однако учитывать, что при эксплуатации солнечной

установки может происходить сильный разогрев материала покрытия и коллектора, что очевидно приводит к росту скорости окислирования металла коллектора. Благодаря теплоносителю зона окислирования металл оказывается в области градиента температуры, что также вносит вклад в рост процесса окисления металла коллектора. Поглощение оксидного покрытия при этом очевидно растет, однако его механические свойства могут сильно деградировать из-за температурного растрескивания.

Результаты контроля фазового состава полученного пленочного металл-оксидного нанокompозита на основе оксидов железа коррелировали с независимыми данными Raman-спектроскопии, а также энергодисперсионной спектроскопии и SEM-анализа. Это позволяет на основании отдельной обучающей выборки данных по нелинейным теплофизическим свойствам пленочного металл-оксидного нанокompозита далее прогнозировать его свойства на всех стадиях роста по данным только бесконтактного in-situ спектрально-оптического контроля и отсюда спрогнозировать температурный режим коллектора гелиоустановки.

Более подробно исследование процессов формирования поглощающих слоев металл-оксидных композитов на железе и стали для использования в качестве поглощающих покрытий коллекторов гелиоустановок будет приведено в следующей статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Agnihotri O.P., Gupta B.K. // Solar selective surfaces. John-Wiley & Sons. NY. 1981.
2. Evangelisti Luca, De Lieto Vollaro Roberto, Asdrubali Francesco. Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. V.114. P. 109318.
3. Ghobadi B., Kowsary F. & Veysi F. Heat Transfer Enhancement Using Rectangular and Triangular Shaped Baffles with and without Nanofluid: New Insight into Optimization of Flow Geometric Parameters. // Prot. Met. Phys. Chem. Surf. 2022. V. 58. P. 486–500.
4. Kennedy C.E. Review of mid-to-high-temperature solar selective absorber materials. United States: National Renewable Energy Laboratory. 2002. NREL/TP-520-31267. July.
5. Boriskina S.V., Ghasemi H. and Chen G. Plasmonic materials for energy: From physics to applications // Materials Today. 2013. V. 16. № 10. P. 375–386.

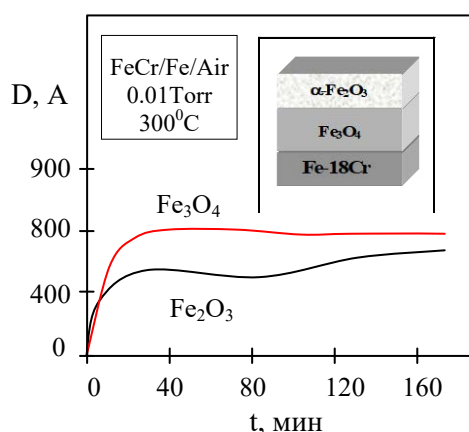


Рис. 3. Трансформация оксидного слоя при окислировании железа: кинетика роста толщины оксида и толщин магнетита и гематита при окислировании напыленного слоя железа при 300°C и степени вакуумирования 0.1 Торр.

6. *Iakobson O.D., Gribkova O.L. & Tameev A.R.* Optimizing the Thickness of Functional Layers of Polymer Solar Cells: Modeling and Experiment. // *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2021. V. 57. P. 753–759.
7. *Demirbilek N., Yakuphanoglu F. & Kaya M.* The Optical and Structural Properties of Undoped ZnO and Co-doped ZnO:Alx:Cdy $x = 1$ at %, $y = 1, 2, 3, 5$ at % Thin Films and Their Electrical Characteristics as Photodiode. // *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2021. V. 57. P. 488–499.
8. *Medina-Almazán A.L., López-García N., Marín-Almazo M. et al.* Evaluation of the Electrochemical Behavior of Preoxidized 304L SS with Hydrothermal Ceramic Nanodeposits at 288°C and 8 MPa. // *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2021. V. 57. P. 723–734.
9. *López-Marino S. et al.* Earth-abundant absorber based solar cells on low weight stainless Steel substrate // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2014. V. 130. P. 347–53.
10. *Zhorin V.A., Kiselev M.R., Vysotsky V.V. et al.* Iron Oxidation in a Mixture with Polycarbonate after Plastic Deformation under High Pressure. // *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2021. V. 57. P. 52–58.
11. *Kumar D., Singh A., Shinde V. et al.* Sol-Ageing Effect on the Structural and Optical Properties of Undoped and Doped ZrO₂ Thin Films. // *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2022. V. 58. P. 999–1010.
12. *Zahra S.t., Syed W.A., Rafiq N. et al.* On Structural, Optical, and Electrical Properties of Chromium Oxide Cr₂O₃ Thin Film for Applications. // *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2021. V. 57. P. 321–328.
13. *Roos A., Ribbing C.G., Carlsson B.* // Stainless steel solar mirrors, A material feasibility study. // *Solar Energy Materials.* 1989. V. 18. № 5. P. 233–240.
14. *Kalogirou S.A.* Solar thermal collectors and applications. // *Progress in Energy and Combustion Science.* 2004. V. 30. № 3. P. 231–295.
15. *Paranaíba O., Neto V.* Intelligent Computational Nanotechnology: The Role of Computational Intelligence in the Development of Nanoscience and Nanotechnology // *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience.* 2014. V. 11. P. 1–17.
16. *Li D., and Du Y.* Artificial intelligence with uncertainty. Chapman & Hall/CRC. Taylor & Francis Group. N.Y. 2008.
17. *Kotenev V.A.* Ellipsometric tomography / *Proc. SPI E.* V.1843. 1992. P.259.
18. *Kotenev V.A.* The Formation of Metal – Oxide Heterostructures at Low. Temperature Oxidation of Alloys Based on the Fe – 18Cr System. // *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2021. V. 57. P. 1150–1158.
19. *Kotenev V.A.* // *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2023. V. 59. № 4. P. 577–586.
20. *Буркс Н. Майер Дж.* Введение в высокотемпературное окисление металлов. М.: Металлургия. 1987. 184 с. N. Birks. G. H. Meier // *Introduction to high temperature oxidation of metals.* // Edward Arnold. 1987.
21. *Tanaka T.* Optical constants of polycrystalline 3d transition metal oxides in the wavelength region 350 to 1200 nm. // *Jap. J. Appl. Phys.* 1979. V.18. № 6. P. 1043–1047.
22. *Gardiner D.J., Littleton C.J., Thomas K.M., Stratford K.N.* // *Oxidation of Metals.* 1987. V. 27. № 1/2. P. 57.
23. *Losurdo M., Hingerl K.* Ellipsometry at the Nanoscale. Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg. 2013
24. *Azzam R. M. A., Kemp Jr R. H.* Aider functions of stratified and inhomogeneous light-reflecting structures // *Surface science.* 1983. V. 135. N. 1–3. P. 261–275.
25. *Fujiwara H.* Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications. Wiley. West Sussex. 2007.
26. *Kaiser J.H.* Regularization in Ellipsometry // *Appl. Phys. B.* 1988. V.45. P.1.
27. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука. 1986. 287 С.
28. *Верлань А.Ф., Сизиков В.С.* Интегральные уравнения. Киев: Наукова Думка, 1986. 543 С.
29. *Petrik P., Agocs E., Volk J., Lukacs I. et al.* Resolving lateral and vertical structures by ellipsometry using wavelength range scan // *Thin Solid Films.* 2014. V. 571. Part 3. P. 579–583.
30. *Mar H.Y.B. et al.* Techn. Rept. № PB-252–383. Honeywell Corporation. 1976.
31. *Котенев В.А.* О низкотемпературной пассивности железа при газовом окислении. // *Защита металлов.* 200. Т. 39. № 4. С. 341–351.
32. *Котенев В. А., Петрунин М. А., Максаева Л. Б. и др.* Вакуумное окисление нанопленок свеженапыленного железа. // *Физикохимия поверхности и защита материалов.* 2013. Т. 49. № 4. С. 442–448.