Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 11

ТВЕРЬ 2019

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2019. – Вып. 11. – 680 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2019

© Тверской государственнй университет, 2019

УДК 621.9.048.7

Оригинальная статья

ЭЛЕКТРОННО-СТИМУЛИРОВАННАЯ АДСОРБЦИЯ КИСЛОРОДА НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

О.Г. Ашхотов, И.Б. Ашхотова, М.А. Алероев, Д.А. Крымшохалова
ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173
oandi@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.026

Аннотация: Явление электронно-стимулированной адсорбции имеет место практически во всех приборах, где используется электронная эмиссия. Электронно-стимулированная адсорбция может оказывать существенное влияние на состояние адсорбированного слоя. В настоящем обзоре приведены типичные результаты, полученные при изучении электронно-стимулированных процессов адсорбции кислорода из газовой фазы и основные закономерности изменения поверхностной структуры, вызванные электронно-стимулированной адсорбцией.

Ключевые слова: спектроскопия, поверхность, электроны, излучение, диссоциация, миграция, адсорбция, десорбция, эксперименты, экспозиция.

1. Введение

Известно [1], что частицы, сталкиваясь с твердым телом, передают часть импульса и энергии атомам, входящим в состав самого твердого тела. Если переданная энергия окажется сравнимой с энергией связи атома в решетке твердого тела или выше этого значения, то он может либо сместиться на значительное от своего равновесного положения расстояние, либо вовсе покинуть твердое тело. Аналогичные процессы происходят и в газовой фазе над поверхностью твердого тела. В зависимости от того, какие используются частицы, излучения или поля для возбуждения, можно наблюдать различные явления. Результатом этих взаимодействий являются электронные возбуждения, упругие столкновения с атомами, изменение заряда и влияние на вторичную электронную эмиссию. Эти микроскопические явления приводят к большим макроскопическим эффектам, таким как диссоциация, миграция, десорбция и адсорбция. Первые три из перечисленных подробно описаны в [1, 2], если в качестве внешних частиц использовать электроны. Обзорных работ, посвященных четвертому процессу, по нашим сведениям, мало при том, что анализ исследований электронно-стимулированной адсорбции (ЭСА) представляет значительный интерес для физики и химии поверхности. Предмет настоящего обзора – типичные результаты, полученные при изучении электронно-стимулированных процессов адсорбции кислорода из газовой фазы и основные закономерности изменения поверхностной структуры, вызванные ЭСА. Список литературы включает в себя основные работы по тематике, но не является исчерпывающим.

2. Результаты экспериментального изучения электронно-стимулированной адсорбции

Электронно-стимулированная адсорбция на чистую поверхность различных полупроводников и металлов рассматривалась многими исследователями, начиная с 70-х годов XX века. Большинство работ, в которых были предприняты попытки изучения ЭСА, было выполнено с потоками электронов малой интенсивности, при которых исключались тепловые эффекты. Одними из первых, наблюдавших этот эффект, были авторы работы [3].

Позднее авторы [4] наблюдали стимулированную электронами адсорбцию кислорода и CO на поверхности кремния. Один из результатов этой работы приведен на рис. 1, где показаны амплитуды оже-пика кислорода из серии KLL в зависимости от экспозиции в среде кислорода при $5 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст. поверхности $Si(111)$ при $20^\circ C$ с непрерывным электронным облучением при 2500 эВ и $0,25 \text{ мА/см}^2$ без него.

Рис. 1. Амплитуда KLL оже-пика кислорода в зависимости от экспозиции в среде кислорода с включенным электронным пучком энергией $E = 2500$ эВ при плотности тока $0,25 \text{ мА/см}^2$ и без него [4].

Значительный рост кислородного оже-сигнала при незначительном кислородном воздействии, не зависящий от облучения электронным пучком, авторы объяснили формированием кислородного монослоя на поверхности. На ход кривых при дальнейшей выдержке в кислороде влияло участие электронов в адсорбционном процессе. Оказалось, что внешнее воздействие приводит к существенному росту концентрации кислорода на поверхности кремния. В этой же работе отмечается, что при энергиях электронов около 500 эВ и ниже, эффект ЭСА практически не наблюдался.

Авторы [4] объяснили ЭСА диссоциацией молекулярного кислорода, которая падает с уменьшением энергии и количества обратнорассеянных первичных и истинно-вторичных электронов.

В другой работе [5], авторы, тщательно проработав методику эксперимента, изучили ЭСА кислорода на чистых и окисленных поверхностях германия. Изучаемыми оже-переходами были $MVN\ Ge\ 89\ \text{эВ}$ и $KLL\ O\ 510\ \text{эВ}$. Энергия электронов, падающих нормально к поверхности образца – $1500\ \text{эВ}$ при плотности $I_p = 2,0\ \text{мкА/мм}^2$.

Чтобы проиллюстрировать влияние электронов на процесс адсорбции кислорода авторы [5] проводили анализ как облученных, так и необлученных участков поверхности образца. На рис. 2 приведены зависимости амплитуд оже-пику O и Ge на разных участках после экспозиции в среде кислорода $1 \cdot 10^{-6}\ \text{мм рт. ст. мин.}$ и после нагрева при 250°C в течение 45 мин.

Рис. 2. Зависимости амплитуд оже-пику O (а) и Ge (б) после экспозиции в среде кислорода $1 \cdot 10^{-6}\ \text{мм рт. ст. мин.}$ и после прогрева при 250°C в течение 45 мин.

Видно, что на облученной электронами поверхности оже-сигнал от кислорода почти в 2,5 раза больше, чем аналогичный сигнал на необлученном участке (см. рис. 2 а). Аналогичный ход кинетической кривой был получен и для оже-пика Ge , но его амплитуда в таком же соотношении уменьшалась по мере приближения к облученному участку (см. рис. 2 б). Эффект ЭСА зависел как от тока, так и от энергии

первичных электронов, причем нижний порог, при котором он наблюдался для *Ge*, был 16,5 эВ. Увеличение тока стимулирующих электронов приводило к росту отношения амплитуд на облученном и необлученном участках для кислорода в четыре раза и соответствующему уменьшению для *Ge* в тринадцать раз. Различие в кратности, по-видимому, связано с разной длиной свободного пробега оже-электронов кислорода и германия. В этой же работе было показано, что эффект ЭСА проявляется на низкоэнергетических оже-переходах, вследствие малой глубины выхода оже-электронов. Длина свободного пробега высокоэнергетичных оже-электронов значительно больше и соответственно больше толщина анализируемого слоя, поэтому ЭСА при использовании высокоэнергетичных оже-пигов практически не наблюдается.

В литературе встречаются работы, где показано, что эффект не зависит от парциального давления адсорбатов. Такое наблюдение было сделано, например, в [6] при исследовании электронно-стимулированного окисления алюминиевых поверхностей, где показано, что электроны стимулируют хемосорбцию кислорода, который латерально диффундировал в облученную область, причем парциальное давление кислорода не влияло на ЭСА.

В [7] наблюдалось появление *C* и *O* на поверхности *Si*(111), помещенного напротив работающей пушки оже-спектрометра. Было установлено, что при работе электронной пушки возникает поток молекул *CO*, сильно зависящий от накала катода. Оказалось, что окись *CO* образовывалась на накаливаемом катоде электронной пушки. Кроме *CO* при таких условиях могут образовываться различные углеводороды, однако их количество по данным [7] пренебрежимо мало. Авторы [8] изучили кинетику ЭСА молекул *CO* на поверхности *Si*(111)7×7, а также некоторые особенности, связанные с диссоциацией и ионизацией молекул *CO* при адсорбции.

Эксперименты в [8] были выполнены в сверхвысоковакуумной камере с остаточным давлением примерно $2 \cdot 10^{-10}$ мм рт. ст. Вначале было проведено длительное облучение поверхности *Si* электронным пучком для стимуляции процесса адсорбции. Через 6 часов после начала облучения на оже-спектрах были обнаружены пики *C* и *O*, интенсивность которых не изменялась при нагреве образца до 600 °С в течение нескольких минут. Так как молекулы *CO* при таком нагреве не десорбировались, то был сделан вывод, что *CO* диссоциирует с образованием соединений с атомами *Si*. Проанализировав *Si* LVV оже-спектр, авторы установили, что при энергиях 61 и 74 эВ появляются пики, характерные для *SiO₂* на начальных стадиях окисления. После сравнения профилей *C* KVV оже-спектра с результатами [9,10] авторы [8] пришли к выводу, что углерод на поверхности находится в

связанном состоянии. Дальнейшее облучение приводило к монотонному росту интенсивности этих пиков, причем облучение поверхности Si с предварительно адсорбированным кислородом приводило к снижению амплитуды с последующим ростом интенсивности оже-пика кислорода. Был сделан вывод, что уменьшение интенсивности оже-пика O на начальном участке обусловлено процессом электронно-стимулированной десорбции O , а дальнейший рост интенсивности оже-пика кислорода связан с образованием SiO_2 в процессе диссоциации CO под действием электронного пучка. Таким образом, было установлено, что процессы десорбции O под действием электронного пучка и образование SiO_2 при диссоциации молекул CO могут протекать одновременно.

Из работ, интересных с точки зрения выяснения механизма ЭСА следует отметить [11], где авторы предложили 4-х шаговую модель процесса электронно-стимулированного окисления поверхности кремния при комнатной температуре: хемосорбция O , промежуточное окисление, тонкий слой SiO_2 и объемно-подобный SiO_2 .

В работе анализировалась при комнатной температуре как облученная электронами поверхность, так и необлученная. Внимание исследователей было сосредоточено на измерении следующих характеристик оже-спектра в зависимости от времени: высота основных пиков $h(Si), h(SiO_2)$ и $h(O)$; энергия E оже-перехода SiO_2 и ширина оже-пика на половине высоты SiO_2 ; энергия $E(O)$ оже-пика кислорода (см. рис. 3). Полученные данные, приведенные на рис. 4 свидетельствуют о наличии трех перегибов на кинетической кривой $I_{Si} = f(t)$, полученной при непрерывном электронном облучении поверхности образца.

Первый излом авторы объяснили завершением хемосорбции монослоя кислорода. Второй излом соответствовал верхнему пределу при образовании промежуточного слоя окиси. За вторым изломом начиналось образование SiO_2 , отличного, однако от объемного оксида кремния. Аналогично энергия и ширина пика SiO_2 изменялись со временем, соответственно изменялась и энергия пика кислорода. Третий излом соответствовал переходу от тонкого оксида к объемно-подобному SiO_2 .

Этапы электронно-стимулирующего окисления и характер результирующей окиси, по данным [11], такие же, как и для термической окиси. По этой причине возникает интерес с практической точки зрения – возможность локального выращивания SiO_2 при комнатной температуре, например, в технологиях нанoeлектроники.

Анализ рассмотренных работ показал, что ЭСА обычно возникает вследствие возбуждения молекул газовой среды. В [12] сообщается о процессах ЭСА в отсутствие электронного возбуждения газовой фазы. Этот

механизм особенно очевиден в компаундных полупроводниках [12] для которых характерно увеличение адсорбционной способности газовой фазы через возбуждение поверхностных атомов и дефектов.

Рис. 3. Изменение оже-пика SiO_2 в ходе электронно-стимулированного окисления: а – интенсивность оже-пика; б – энергия оже-пика; в – ширина пика на половине высоты (ШПВ).

Рис. 5 иллюстрирует кислородную адсорбцию во время электронного облучения при 4 кэВ и $0,2 \text{ мА/см}^2$ для различных полупроводников. Запрещенная зона для этих полупроводников составляет 1,11 эВ (Si), 1,58 эВ ($CdTe$), 1,83 эВ ($GaAs$), 2,42 эВ (CdS), 2,7 эВ ($ZnSe$ $ZnSe$). Видно, что полученные результаты коррелируют с шириной запрещенной зоны полупроводников.

Рис. 4. Временная зависимость амплитуды оже-пика Si в ходе окисления при непрерывном электронном облучении $I_{Si} = h(Si) / h^0(Si)$, где $h^0(Si)$ – амплитуда оже-пика Si для атомарно-чистой поверхности.

Рис. 5. Временная зависимость адсорбции кислорода на поверхности полупроводников при электронной бомбардировке ($0,2 \text{ мА/см}^2$) в присутствии $2 \cdot 10^{-3} \text{ мм. рт. ст. } H_2O$ по данным [12].

Первые же эксперименты по изучению ЭСА показали влияние паров воды на исследуемые процессы даже при незначительных парциальных давлениях [13]. Практическое значение этого факта очевидно, так как влажное окисление полупроводников используется, например, в биполярной технологии для создания окисной изоляции в МОП (металл-оксид-полупроводник) технологии. В [13] была зафиксирована адсорбция

H_2O на чистой поверхности никеля вызванная электронным пучком. Пары воды напускали в сверхвысоковакуумную систему через регулируемый натекатель при изначально атомарно-чистой поверхности никеля. Для регистрации оже-спектров при разных электронных экспозициях во влажной среде использовали электроны с энергией 3 кэВ. В своей работе [13] исследователи привели зависимость концентрации кислорода от парциального давления воды при электронном токе 2,9 мкА (см. рис. 6).

При минимальном парциальном давлении $H_2O \sim 10^{-8}$ мм рт. ст. и плотности тока 10 мА/см² этот эффект наблюдался только через несколько минут [13]. Видно, что амплитуда оже-пика кислорода растет практически линейно с дальнейшим выходом на насыщение.

Рис. 6. Эффект влияния парциального давления H_2O (в мм зт. ст.) на концентрацию кислорода на поверхности никеля по данным [13].

В [14] сообщается об исследованиях методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и электронной оже-спектроскопии поверхностных процессов, включая и ЭСА, которая наблюдалась на чистых поверхностях CdS в сверхвысоковакуумных условиях ($\sim 10^{-10}$ мм рт. ст.). На рис. 7 приведены оже-спектры для поверхностей CdS в присутствии H_2O на уровне $2 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст. с электронным облучением и без него в среде с гораздо большим давлением паров воды.

В отсутствии электронного облучения после 15 мин. экспозиции в среде с парциальным давлением воды ~ 1 мм. рт. ст., адсорбция кислорода не наблюдалась вообще, тогда как включение электронов с энергией 4 кэВ при 4 мА/см² приводило к появлению на спектре интенсивного кислородного пика. Явные изменения после длительного электронного

облучения проявлялись на оже-пиках серы (LMM) при 150 эВ. Авторы [14] объяснили их тем, что на начальных этапах ЭСА, кислород предпочтительно связывается с серой, с его последующим соединением с атомами кадмия. Это также подтверждает тот факт, что электронное облучение может возбуждать поверхность, а не только газообразный адсорбат.

Рис. 7. Оже-спектры поверхности $CdS(0001)$: а) после 60 мин. электронного облучения при $0,4 \text{ мА/см}^2$ в присутствии $2 \cdot 10^{-8} \text{ мм. рт. ст. } H_2O$ и б) после 15 мин. экспозиции в среде нескольких мм. рт. ст. воды, но без электронного облучения [14].

Позднее [15] появились данные о масс-спектрометрическом обнаружении адсорбции молекул H_2O на поверхности поликристаллической Pt при комнатной температуре, стимулированной облучением электронами с энергией 2,5 кэВ. В работе [15] парциальное давление паров воды в интервале $10^{-9} - 10^{-7} \text{ мм рт. ст.}$ регулировали с помощью натекателя при работающих магниторазрядных насосах. Авторы анализировали зависимости парциального давления H_2O от времени бомбардировки электронами. Было обнаружено [15], что быстрый начальный спад после включения электронного пучка сменялся медленным снижением давления H_2O , а после выключения электронной пушки давление H_2O возвращалось к первоначальному уровню. Медленное изменение давления после длительной бомбардировки, а также

плавную релаксацию после выключения электронного пучка, авторы [15] объяснили тем, что давление в газовой фазе вакуумной камеры определяется не только скоростями напуска, мощностью вакуумных насосов и удалением за счет электронно-стимулированной адсорбции на поверхности Pt , но и скоростями сорбционных процессов на стенках рабочей камеры.

При изменении давления H_2O адсорбционное равновесие на поверхности стенок нарушалось и они играли роль либо дополнительного источника, либо сорбента H_2O . На наш взгляд, подобное отклонение от линейности и немонотонность хода можно объяснить разогревом поверхности электронным пучком при больших мощностях пучка, что должно приводить к снижению концентрации молекул H_2O адсорбированных на поверхности.

Позднее [16-18] была изучена ЭСА кислорода на поверхности Al, In, Tl , которая значительно возрастает при электронной стимуляции для всех изученных энергий. В этом случае при экспозициях до 5000 Л наблюдается только начальная стадия образования оксидного слоя на поверхности металлов – физическая и химическая адсорбция кислорода, за которой следует начальная стадия окисления, завершающаяся формированием промежуточного тонкого слоя, как правило, отличного от объемного оксида.

3. Механизмы электронно-стимулированной адсорбции

ЭСА – сравнительно часто встречающееся, но мало изученное явление. Она может оказать большое влияние на характер взаимодействия электронов с поверхностью твердого тела и играет важную роль во многих технологических процессах микро- и нанoeлектроники, таких как науглероживание, физическая и химическая адсорбция, окисление и др. Без знания закономерностей ЭСА невозможна правильная интерпретация результатов, полученных современными методами анализа поверхности – электронная оже-спектроскопия, дифракция электронов низкой энергии и др.

Наблюдаемые в экспериментах эффекты ЭСА позволяют получить следующие представления о процессе. Электронно-стимулированная адсорбция является эффектом на уровне монослоя, где частицы газовой фазы адсорбируются или реагируют с поверхностью под электронным облучением [19]. В отсутствии облучения электронным пучком адсорбционные процессы протекают значительно медленнее. Общепринятая модель процесса ЭСА предполагает электронное возбуждение, ионизацию или диссоциацию молекулы в газовой фазе над поверхностью, а возбужденные молекулы или их фрагменты физически

адсорбируются и реагируют с поверхностью намного чаще, чем это наблюдается в отсутствие электронной стимуляции. В ряде случаев наблюдалось возбуждение поверхностных атомов, приводящее к ЭСА.

4. Заключение

При изучении ЭСА необходима информация об исходном и текущем состоянии поверхности адсорбента, составе остаточного газа и влиянии на этот процесс параметров, определяющих электронный пучок. Для получения указанной информации существует целый комплекс методов диагностики поверхности – электронная оже-спектроскопия, фотоэлектронная спектроскопия, спектроскопия характеристических потерь энергии электронами, дифракция низкоэнергетических электронов и др.

В настоящее время разработана методика и сформулированы условия проведения экспериментов по исследованию ЭСА кислорода на атомарно-чистых поверхностях металлов и полупроводников для чего определена максимальная доза электронного облучения, при которой не наблюдается ЭСА.

При экспозициях в среде кислорода до 5000 Л с электронной стимуляцией адсорбции на поверхностях изученных металлов наблюдается только начальная стадия образования оксидного слоя, которая происходит в три этапа - физическая и химическая адсорбция кислорода, за которой следует начальная стадия окисления, завершающаяся формированием промежуточного тонкого слоя. Механизм роста субмонослойной пленки является послойным (механизм Франка – Ван дер Мерве).

Анализ рассмотренных работ показал, что ЭСА наблюдалась для многих простых молекул. Однако количественные данные весьма ограничены. В некоторых работах условия эксперимента не полностью описаны. Недостаточно изучено влияние ориентации подложки и вторичных электронов на ЭСА. Практически отсутствуют данные о влиянии низкоэнергетичных электронов на адсорбционные процессы.

Библиографический список:

1. **Зенгуил, Э.** Физика поверхности / Э. Зенгуил; пер. с англ. С. А. Венкстерна и др.; под ред. В. Ф. Киселева. – М.: Мир, 1990. – 536 с.
2. **Вудраф, Д.** Современные методы исследования поверхности / Д. Вудраф, Т. Делчар. – М.: Мир, 1989. – 564 с.
3. **Coad, J.P.** Electron-beam assisted adsorption on the *Si*(111) surface / J.P. Coad, H.E. Bishop, J.C. Rivière // *Surface Science*. – 1970. – V. 21. – I. 2. – P. 253-264.
4. **Kirby, R.E.** Electron beam induced effects on gas adsorption utilizing auger electron spectroscopy: *CO* and *O₂* on *Si*: I. Adsorption studies / R.E. Kirby, D. Lichtman // *Surface*

Science. – 1974. – V. 41. – I. 2. – P. 447-466.

5. **Margoninski, Y.** The interference of an electron beam with the surface reaction between oxygen and germanium / Y. Margoninski, D. Segal, R.E. Kirby // Surface Science. – 1975. – V. 53. – I. 1. – P. 488-499.

6. **Clampitt, R.** Miniature ion sources for analytical instruments / R. Clampitt, D.K. Jefferies // Nuclear Instruments and Methods. – 1978. – V. 149. – I. 1-3. – P. 739-742.

7. **Kasupke, N.** Oxygen on cleaved silicon (111): Effects of atomic steps and residual gases / N. Kasupke, M. Henzler // Surface Science. – 1980. – V. 92. – I. 2-3. – P. 407-416.

8. **Лифшиц, В.Г.** Электронно-стимулированная адсорбция молекул CO на поверхности Si(111)7×7 / В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин // Украинский физический журнал. – 1982. – Т. 27. – № 8. – С. 1213-1216.

9. **Chang, C.C.** Analytical Auger electron spectroscopy / C.C. Chang // In book: Characterisation of solid surfaces / C.C. Chang; ed. by P.F. Kane, G.B. Larrabee. – New York: Plenum Press, 1974. – Chapter 20. – P. 509-575.

10. **Gavriljuk, Yu.L.** Electron energy states of carbon in Auger, energy loss and X-ray spectroscopies / Yu.L. Gavriljuk, V.G. Lifshits // Solid State Communications. – 1980. – V. 36. – I. 2. – P. 155-158.

11. **Carrière, B.** AES study of the low-pressure oxidation of Si(100): Electron beam effects / B. Carrière, A. Chouiyakh, B. Lang // Surface Science. – 1983. – V. 126. – I. 1-3. – P. 495-501.

12. **Liebl, H.** Analytical Requirements of SIMS and the Instrumental Implications / H. Liebl // Proceedings of the Second International Conference on Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS II) Stanford University, Stanford, California, USA August 27–31, 1979; ed. by A. Benninghoven, C.A.J. Evans, R.A. Powell, R. Shimizu, H.A. Storms. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1979. – P. 176-180.

13. **Tompkins, H.G.** The electron stimulated interaction of H_2O with a nickel surface / H.G. Tompkins // Surface Science. – 1977. – V. 62. – I. 1. – P. 293-302.

14. **Lichtensteige, M.** Electron stimulated adsorption: surface activation and preferential binding of oxygen to sulfur on CdS / M. Lichtensteiger, C. Webb, J. Lagowski // Surface Science. – 1980. – V. 97. – I. 2-3. – P. L375-L379.

15. **Кощев, А.П.** Электронно-стимулированная адсорбция паров воды на поверхности платины / А.П. Кощев, И.А. Мясников // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1985. – № 6. – С. 63-67.

16. **Ашхотов, О.Г.** Электронно-стимулированное окисление индия в вакууме / О.Г. Ашхотов, Д.А. Крымшохалова, И.Б. Ашхотова // Журнал физической химии. – 2010. – Т. 84. – № 12. – С. 2287-2290.

17. **Ашхотов, О.Г.** Исследование начальной стадии электронно-стимулированного окисления таллия / О.Г. Ашхотов, Д.А. Крымшохалова, И.Б. Ашхотова, А.А. Дышеков // Известия РАН. Серия физическая. – 2012. – Т. 76. – № 13. – С. 42-43.

18. **Ашхотов, О.Г.** Оже-спектроскопия электронно-стимулированной адсорбции кислорода на поверхности поликристаллического алюминия / О.Г. Ашхотов, Д.А. Крымшохалова, И.Б. Ашхотова // Известия РАН. Серия физическая. – 2014. – Т. 78. – № 8. – С. 995-997.

19. Beam effects, surface topography and depth profiling in surface analysis / ed. by A.W. Czanderna, T.E. Madey, C. J. Powell // In series: Methods of surface characterization. – V. 5 – New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 451 p.

References:

1. **Zenguil, E.** Surface physics / E. Zenguil; per. s angl. S. A. Venksterna et al.; pod red. V.F. Kiseleva. – M.: Mir, 1990. – 536 p. (In Russian).
2. **Vudraf, D.** Modern surface research methods / D. Vudraf, T. Delchar. – M.: Mir, 1989. – 564 p. (In Russian).
3. **Coad, J.P.** Electron-beam assisted adsorption on the *Si(111)* surface / J.P. Coad, H.E. Bishop, J.C. Rivière // *Surface Science*. – 1970. – V. 21. – I. 2. – P. 253-264.
4. **Kirby, R.E.** Electron beam induced effects on gas adsorption utilizing auger electron spectroscopy: *CO* and *O₂* on *Si*: I. Adsorption studies / R.E. Kirby, D. Lichtman // *Surface Science*. – 1974. – V. 41. – I. 2. – P. 447-466.
5. **Margoninski, Y.** The interference of an electron beam with the surface reaction between oxygen and germanium / Y. Margoninski, D. Segal, R.E. Kirby // *Surface Science*. – 1975. – V. 53. – I. 1. – P. 488-499.
6. **Clampitt, R.** Miniature ion sources for analytical instruments/ R. Clampitt, D.K. Jefferies // *Nuclear Instruments and Methods*. – 1978. – V. 149. – I. 1-3. – P. 739-742.
7. **Kasupke, N.** Oxygen on cleaved silicon (111): Effects of atomic steps and residual gases / N. Kasupke, M. Henzler // *Surface Science*. – 1980. – V. 92. – I. 2-3. – P. 407- 416.
8. **Lifshits, V.G.** Electron-stimulated adsorption of molecules *CO* on the surface *Si(111)7×7* / V.G. Lifshits, A.A. Saranin // *Ukrainskij fizicheskij zhurnal*. – 1982. – V. 27. – № 8. – P. 1213-1216. (In Russian).
9. **Chang, C.C.** Analytical Auger electron spectroscopy / C.C. Chang // In book: *Characterisation of solid surfaces* / C.C. Chang; ed. by P.F. Kane, G.B. Larrabee. – New York: Plenum Press, 1974. – Chapter 20. – P. 509-575.
10. **Gavriljuk, Yu.L.** Electron energy states of carbon in Auger, energy loss and X-ray spectroscopies / Yu.L. Gavriljuk, V.G. Lifshits // *Solid State Communs*, 1980. – V. 36. – I. 2. – P. 155-158.
11. **Carrière, B.** AES study of the low-pressure oxidation of *Si(100)*: Electron beam effects / B. Carrière, A. Chouiyakh, B. Lang // *Surface Science*. – 1983. – V. 126. – I. 1-3. – P.495-501.
12. **Liebl, H.** Analytical Requirements of SIMS and the Instrumental Implications / H. Liebl // *Proceedings of the Second International Conference on Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS II)* Stanford University, Stanford, California, USA August 27–31, 1979; ed. by A. Benninghoven, C.A.J. Evans, R.A. Powell, R. Shimizu, H.A. Storms. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1979. – P. 176-180.
13. **Tompkins, H.G.** The electron stimulated interaction of *H₂O* with a nickel surface / H.G. Tompkins // *Surface Science*. – 1977. – V. 62. – I. 1. – P. 293-302.
14. **Lichtensteige, M.** Electron stimulated adsorption: surface activation and preferential binding of oxygen to sulfur on *CdS* / M. Lichtensteiger, C. Webb, J. Lagowski // *Surface Science*. – 1980. – V. 97. – I. 2-3. – P. L375-L379.
15. **Koshcheev, A.P.** Electron-stimulated adsorption of water vapor on the surface of platinum / A.P. Koshcheev, I.A. Myasnikov // *Poverkhnost'. Fizika, khimiya, mekhanika*. – 1985. – № 6. – P. 63-67. (In Russian).
16. **Ashkhotov, O.G.** The electron stimulated oxidation of indium in a vacuum / O.G. Ashkhotov, D.A. Krymshokalova, I.B. Ashkhotova // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. – 2010. – V. 84. – I. 12. – P. 2092-2094.
17. **Ashkhotov, O.G.** Investigation of the initial stage of electron-stimulated thallium

oxidation / O.G. Ashkhotov, D.A. Krymshokalova, I.B. Ashkhotova, A.A. Dyshekov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2012. – V. 76. – № 13. – P. 42-43. (In Russian).

18. **Ashkhotov, O.G.** Auger spectroscopy of the electron-stimulated absorption of oxygen on surfaces of polycrystalline aluminum / O.G. Ashkhotov, I.B. Ashkhotova, D.A. Krymshokalova // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2014. – V. 78. – I. 8. P. 995-997.

19. Beam effects, surface topography and depth profiling in surface analysis / ed. by A.W. Czanderna, T.E. Madey, C. J. Powell // In series: Methods of surface characterization. – V. 5 – New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 451 p.

Original paper

ELECTRON-STIMULATED OXYGEN ADSORPTION ON THE SURFACE OF METALS AND SEMICONDUCTORS

O.G. Ashkhotov, I.B. Ashkhotova, M.A. Aleroev, D.A. Krymshokalova

Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.026

Abstract: The phenomenon of electron-stimulated adsorption occurs in almost all devices where electron emission is used. Electron-stimulated adsorption can have a significant effect on the state of the adsorbed layer. This review presents typical results obtained in the study of electronically stimulated processes of the oxygen adsorption from a gas phase and the main patterns of changes in the surface structure caused by electron-stimulated adsorption.

Keywords: *spectroscopy, surface, electrons, radiation, dissociation, migration, adsorption, desorption, experiments, exposure.*

Ашхотов Олег Газизович – д.ф.-м.н., профессор кафедры электроники и информационных технологий института информатики, электроники и компьютерных технологий, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Ашхотова Ирина Борисовна – к.т.н., доцент кафедры электроники и информационных технологий института информатики, электроники и компьютерных технологий, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Алероев Муслим Ахметханович – аспирант кафедры электроники и информационных технологий института информатики, электроники и компьютерных технологий, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Крымшохалова Джюльетта Абузалиевна – к.ф.-м.н., инженер кафедры электроники и информационных технологий института информатики, электроники и компьютерных технологий, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Oleg G. Ashkhotov – Dr. Sc., Professor, Department of Electronics and Information Technologies, Institute of Informatics, Electronics and Computer Technologies, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Irina B. Ashkhotova – Ph. D., Docent, Department of Electronics and Information Technologies, Institute of Informatics, Electronics and Computer Technologies, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Muslim A. Aleroev – postgraduate student, Department of Electronics and Information Technologies, Institute of Informatics, Electronics and Computer Technologies, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Djulietta A. Krymshokalova – Ph.D., Engineer, Department of Electronics and Information Technologies, Institute of Informatics, Electronics and Computer Technologies, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Поступила в редакцию/received: 01.09.2019; после рецензирования/revised: 10.10.2019; принята/accepted 04.11.2019.