

LOW-ENERGY ELECTRON DESTRUCTION OF SOLIDS SURFACES

S. S. ELOVIKOV

It is shown in a simple way how the low-energy electrons may destruct the surfaces of solids. For the explanation of such amazing phenomena the generally accepted models of the electron stimulated desorption based on the decay of the excited states created by low-energy electrons in solids are used.

В доступной форме показано, каким образом медленные электроны могут приводить к разрушению поверхностей твердых тел. Для объяснения этих удивительных явлений используются общепринятые модели электронно-стимулированной десорбции, которые основаны на распаде электронных возбуждений, создаваемых в твердом теле низкоэнергетическими электронами.

РАЗРУШЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА МЕДЛЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

С. С. ЕЛОВИКОВ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

Один из важных разделов современной науки посвящен исследованию явлений, происходящих при взаимодействии излучения с веществом. Успехи в этой области знаний во многом определяют настоящее и будущее прикладных наук, и в первую очередь материаловедения, для которого на одном из первых мест стоит задача создания материалов с повышенной радиационной стойкостью. Это объясняется тем, что в настоящее время приборы и устройства эксплуатируются в таких условиях, где они подвергаются воздействию различных излучений. Например, это имеет место в космических аппаратах, термоядерных реакторах, а также электровакуумных и газоразрядных приборах, где на материалы воздействуют фотоны, ионы и электроны с различными энергиями. При определенных условиях эти частицы могут приводить к разрушению твердых тел. Ранее считалось, что для этой цели, например, ионам достаточна энергия в несколько десятков электронвольт, а электроны необходимо разгонять до энергии в сотни килоэлектронвольт.

Однако не так давно было обнаружено, что и более медленные электроны (с энергиями всего лишь в несколько десятков электронвольт) также разрушают твердые тела. Поскольку такие электроны проникают в твердое тело на незначительную глубину, то в этом случае часто говорят о разрушении поверхности твердого тела.

ПОВЕРХНОСТЬ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Поверхностью твердого тела называют границу, отделяющую его от какой-либо другой среды. В результате процессов адсорбции (прилипания) чужеродных атомов и молекул и их диффузии формируются поверхностные слои, свойства которых существенным образом отличаются от свойств объемных фаз. Когда пограничные слои твердых тел не содержат посторонних примесей, поверхность называют чистой. В этом случае ее свойства также отличаются от свойств объема твердого тела, однако эти различия уже не связаны с загрязнениями и объясняются обрывом кристаллической решетки на границе. Иногда при изучении поверхностных явлений и решении практических задач (например,

при нанесении различных слоев в процессе изготовления интегральных схем) желательно иметь по возможности чистые поверхности. Существует несколько способов получения таких поверхностей, но все они предполагают помещение твердого тела в сверхвысокий вакуум. Наиболее совершенный метод получения чистой поверхности — осуществление скола или среза объекта в вакуумной камере. Другие основаны на вакуумной очистке поверхности от примесных атомов и молекул путем их испарения при нагреве, удалении их ультразвуковыми волнами или бомбардировкой атомными частицами (распылением).

Совершенно ясно, что абсолютно чистых поверхностей получить невозможно. Загрязнения возникают даже в сверхвысоком вакууме ($p < 10^{-6}$ Па) в результате адсорбции атомов и молекул, находящихся в остаточной атмосфере вакуумной камеры. Число молекул N с массой m , падающих на 1 м^2 поверхности в секунду, определяется соотношением

$$N = \frac{p}{(2\pi mkT)^{1/2}},$$

где p — давление остаточных газов, k — постоянная Больцмана, T — температура [1]. Максимальное число молекул (атомов), необходимых для заполнения 1 м^2 поверхности (образования монослоя), составляет $\sim 10^{19}$. В случае если эксперимент продолжается, например, 1 час и мы хотим, чтобы поверхность в течение этого времени не содержала более 10^{-1} монослоя, то, как показывает простой расчет, давление остаточных газов не должно превышать 10^{-8} Па. Оценка проведена для молекулярного азота при условии, что каждая молекула, столкнувшись с поверхностью, прилипает к ней. Теперь понятно, почему серьезные исследования поверхностных явлений стали возможны лишь в последние 25–30 лет, когда появились сверхвысоковакуумные установки и методики, позволяющие с высокой точностью контролировать состояние поверхности.

Явления, происходящие на поверхности, обусловлены тесной взаимосвязью процессов, протекающих как в объеме твердого тела, так и в адсорбированных слоях. По этой причине они более разнообразны и сложны по сравнению с теми, которые имеют место лишь в объеме. Подчеркивая это, один из создателей квантовой теории, Вольфганг Паули, в шутку называл поверхность деянием дьявола. На раскрытие этих тайн дьявола — проведение теоретических и экспериментальных исследований свойств поверхности нацелена совсем еще молодая, но бурно развивающаяся область научных знаний — физика поверхности.

Несправедливо было бы считать, что изучение поверхности представляет только научный интерес. Многие из обнаруженных и исследованных поверхностных явлений уже успешно используются в новых технологиях, ярким примером чего служит

поверхностный гетерогенный катализ, широко применяемый в современном химическом производстве. Благодаря тщательному изучению электронных процессов на поверхности достигнуты значительные успехи, пожалуй, в самой быстроразвивающейся отрасли — микроэлектронике.

Одной из серьезных помех, мешающих широкому использованию многих замечательных свойств поверхности, является изменение ее свойств (деградация), происходящее в результате как внутренних процессов, так и внешних воздействий. К числу последних относится и упомянутое выше облучение электронами, ионами и фотонами. Однако в некоторых случаях эти же воздействия могут применяться и в созидательных целях. Направленно изменяя характер протекания процессов на поверхности, они помогают создавать устройства с заранее заданными свойствами. Понятно, что ни создание таких устройств, ни борьба с деградацией поверхности невозможны без понимания сути явлений, происходящих на ней под действием различных излучений. Мы остановимся лишь на некоторых из таких явлений, инициируемых облучением медленными электронами.

Сразу возникает вопрос: какие электроны следует называть медленными, если, даже имея энергию всего лишь 1 эВ, они движутся со скоростью 10^6 м/с, что намного превышает скорость, казалось бы, очень быстрых космических аппаратов?

Прежде чем дать ответ, посмотрим, что происходит при бомбардировке поверхности различными частицами.

УПРУГИЕ И НЕУПРУГИЕ ПРОЦЕССЫ. МЕДЛЕННЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ

Хорошо известно, 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.

Самым простым видом взаимодействия двух частиц является упругое соударение, когда частицы ведут себя как абсолютно упругие шарики. В этом случае, если одна из них покоится и имеет место центральный удар, энергия ΔE , передаваемая налетающей частицей, имеющей массу m и энергию E , покоящейся частице с массой M , определяется следующим соотношением [2]:

$$\Delta E = E \frac{4mM}{(m+M)^2}.$$

При столкновении электрона с любым атомом всегда выполняется соотношение $m \ll M$. Поэтому выражение для ΔE выглядит еще проще:

$$\Delta E = E \frac{4m}{M}.$$

Пользуясь приведенными формулами, легко оценить величины энергии, необходимой налетающим частицам для выбивания, например, атома водорода с энергией связи 10 эВ. Если налетающей частицей является ион водорода, то для этого достаточно, чтобы он обладал кинетической энергией $E > 10$ эВ. Это значение является энергетическим порогом, ниже которого при таком взаимодействии разрушения твердого тела не происходит. При облучении той же мишени электронами пороговая энергия оказывается приблизительно на три порядка большей ($E \approx 10^4$ эВ). Для разрушения твердых тел, состоящих из более тяжелых атомов, энергию электронов необходимо увеличивать до сотен килоэлектронвольт.

Подобным образом можно оценить энергии частиц, необходимые для разрушения адсорбированных слоев. Энергии связи хемосорбированных атомов или молекул (атомов или молекул, вступивших в химическую связь с поверхностными атомами) сравнимы с энергиями связи атомов в твердых телах. Поэтому для их десорбции требуются частицы приблизительно таких же энергий, как и для разрушения твердых тел. В отличие от этого к десорбции физически адсорбированных молекул, энергии связи которых значительно меньше ($\sim 10^{-2}$ эВ), приводит бомбардировка частицами с существенно меньшими энергиями. Например, при использовании электронов такой процесс для тяжелых молекул должен протекать при энергиях в сотни электронвольт.

Необходимо отметить, что при соударениях частиц с твердым телом передача энергии происходит одновременно многим атомам, поэтому значения пороговых энергий, полученные опытным путем, оказываются в несколько раз выше расчетных, когда учитывается лишь парное взаимодействие частиц.

В последнее время получены надежные экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что для ряда объектов десорбция с их поверхности, а в некоторых случаях и разрушение самих объектов происходят при энергиях электронов, меньших 50 эВ. Таким процессам, несмотря на некоторую некорректность, присвоено общее название — электронно-стимулированная десорбция (ЭСД). Их нельзя объяснить рассмотренными выше упругими взаимодействиями, поэтому на помощь привлекают неупругие процессы, связанные с возбуждением электронной подсистемы твердого тела. Вскоре вслед за экспериментальными данными по ЭСД были разработаны физические модели, объясняющие эти интересные явления. Однако, перед тем как перейти к их рассмотрению, выполним свое обещание и попытаемся ответить на вопрос: электроны с каки-

ми энергиями следует считать медленными? Из сказанного выше ясно, что нас в первую очередь интересуют неупругие взаимодействия, стимулированные электронами, происходящие в тончайших приповерхностных слоях твердых тел (с толщиной не более 5 нм). Поэтому имеет смысл говорить о таких электронах, которые при своем движении в твердом теле на отрезке пути длиной 5 нм хотя бы один раз испытали неупругое соударение. Длина свободного пробега (пробег без неупругого взаимодействия) определяется не столько свойствами объекта, сколько скоростью электрона, и в области энергий электронов от 10 до 2000 эВ лежит в пределах как раз 5 нм. Электроны именно с такими энергиями мы будем называть медленными. Понятно, что в других случаях критерии медленности будут иными.

МОДЕЛЬ ЭСД ДЛЯ ЧАСТИЦ, АДСОРБИРОВАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

Первая модель ЭСД была предложена Д. Менцелем, Р. Гомером и П.А. Рэдхедом в 1964 году для системы, состоящей из металла и адсорбированной на его поверхности нейтральной частицы (МГР-модель) [3]. В первоначальном варианте она содержала ряд противоречий, которые впоследствии были устранены П.Р. Антониевичем [3]. Согласно этой модели, падающие электроны переводят электронную подсистему в одно из возбужденных состояний. Рассмотрим простейшее возбуждение — ионизацию адсорбированного атома. На рис. 1, где показаны зависимости потенциальной энергии взаимодействия металла М с нейтральным атомом А (кривая М + А) и ионом А⁺ (кривая М + А⁺) от межъядерного

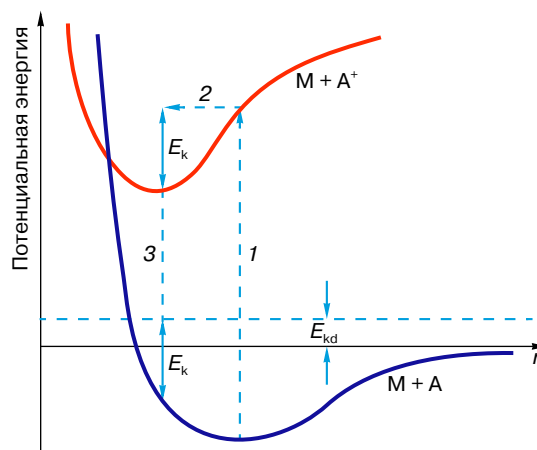


Рис. 1. Модель Антониевича для десорбции нейтральных частиц. Потенциальные кривые взаимодействия поверхности металла М с нейтральной частицей А (М + А) и поверхности металла с ионом А⁺ (М + А⁺); r — межъядерное расстояние

расстояния, этот переход обозначен стрелкой 1. Ионизация и нейтрализация частицы происходят настолько быстро, что за это время они практически не успевают сместиться. Это позволяет переходы из одного состояния в другое изображать вертикальными стрелками (рис. 1). Поскольку радиус положительного иона меньше радиуса нейтрального атома, минимум потенциальной энергии возбужденного состояния ($M + A^+$), соответствующий равновесному состоянию частицы, лежит ближе к поверхностным атомам металла по сравнению с минимумом основного состояния ($M + A$). Если принять во внимание еще и силы зеркального изображения, появляющиеся после ионизации атома, то понятно, что ионизованная частица вначале будет двигаться по направлению к поверхности (стрелка 2 на рис. 1), набирая кинетическую энергию. По мере движения она приближается к металлу, в результате чего резко возрастает вероятность перехода электронов из металла к иону (этот процесс называется туннелированием). В конце концов туннелирование происходит, и ион вновь превращается в нейтральный атом, возвращая систему в исходное состояние (стрелка 3). Полная энергия атома складывается из потенциальной энергии в состоянии $M + A$ и кинетической энергии E_k , которую набрал ион при движении к поверхности. После нейтрализации иона силы зеркального изображения исчезают и остаются лишь силы, выталкивающие частицу с поверхности в вакуум (действие происходит на левой – отталкивательной ветви потенциальной кривой $M + A$). Естественно, что скорость ее движения уменьшается и на некотором расстоянии происходит отражение частицы (направление скорости изменяется на противоположное). Возвратившись в положение, в котором произошла нейтрализация, частица обладает той же кинетической энергией, которую набрала при движении к поверхности в виде иона (E_k). Если величина этой энергии больше глубины потенциальной ямы, в которой находится атом, то он десорбируется с кинетической энергией E_{kd} (рис. 1).

При рассмотрении других возможных электронных возбуждений, например перевода частицы в возбужденное ионизированное состояние, удается объяснить и десорбцию ионов, которая была также обнаружена экспериментально.

ЭСД С ПОВЕРХНОСТЕЙ СОЕДИНЕНИЙ С ИОННОЙ СВЯЗЬЮ

Выше было отмечено, что в некоторых случаях наблюдается не только электронно-стимулированная десорбция чужеродных частиц, но и атомов, входящих в состав самого объекта. По существу этот процесс есть не что иное, как деструкция твердого тела, сопровождаемая десорбцией отдельных компонентов. Наиболее эффективно под действием электронов разрушаются соединения с преимущественной ионной связью, к числу которых, на-

пример, относятся щелочно-галогидные кристаллы (ЩГК) и оксиды с максимальной степенью окисления атомов металла (TiO_2 , Al_2O_3 и т.д.). С помощью МГР-модели полученные результаты объяснить не удалось. В первую очередь это связано с тем, что минимальные энергии электронов, необходимые для ЭСД компонентов ионных соединений (25–35 эВ), оказались существенно выше по сравнению с теми, которые приводят к десорбции адсорбированных на поверхности частиц. Стимулом для создания новой модели, объясняющей ЭСД с поверхностями подобных соединений, послужили эксперименты, в которых наблюдали эмиссию положительных ионов кислорода (O^+) при электронной бомбардировке двуокиси титана (TiO_2). При изучении зависимости потока десорбирующихся ионов кислорода от энергии электронов (рис. 2) было установлено два замечательных факта.

1. Существует энергетический порог (21,8 эВ), начиная с которого десорбция O^+ становится заметной (врезка на рис. 2).

2. При энергиях, больших 33,6 эВ, выход ионов O^+ растет настолько быстро, что, как видно из рис. 2, для их регистрации требуется существенно меньшая (в 500 раз) чувствительность измерительной аппаратуры.

Для объяснения этих данных в 1978 году М.Л. Кнотек и П. Файбельман предложили механизм, согласно которому в результате серии электронных переходов происходит перезарядка отрицательного иона O^{2-} в положительный ион O^+ [3].

На рис. 3 показаны диаграмма энергетических уровней TiO_2 , принимающих участие в этом процессе, и форма электрического потенциала (U) в кристалле. У поверхности периодичность поля нарушается, в результате чего появляется потенциальный барьер, который необходимо преодолеть электрону

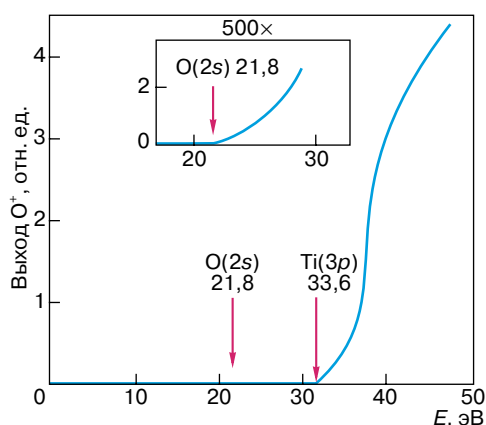


Рис. 2. Зависимость выхода ионов кислорода O^+ от энергии электронов E . Стрелками обозначены энергии, соответствующие энергиям ионизации уровней $O(2s)$ и $Ti(3p)$ в TiO_2

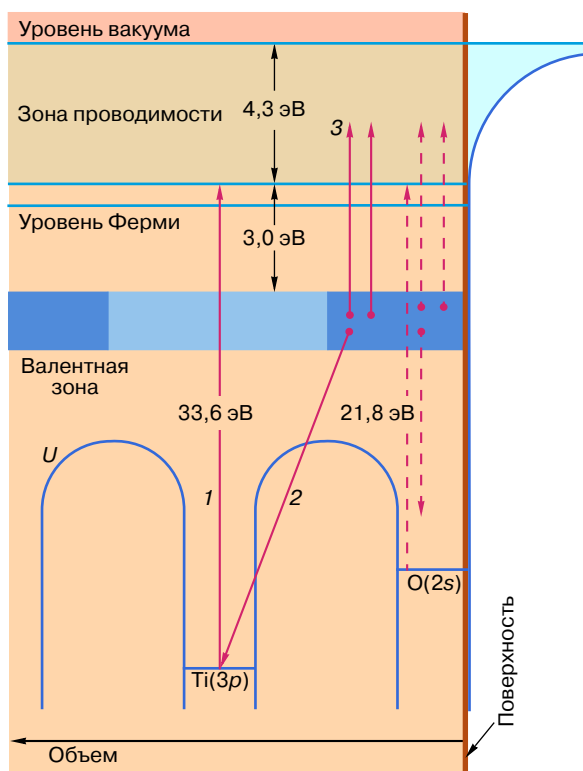


Рис. 3. Схематические изображения энергетических уровней, принимающих участие в перезарядке ионов, и периодического потенциала электрического поля в кристалле TiO_2 . Пояснения к имеющимся на рисунке названиям см. в тексте

для выхода из твердого тела. Точное совпадение энергий, необходимых для ионизации уровней $\text{O}(2s)$ и $\text{Ti}(3p)$ со значениями пороговых энергий ЭСД ионов O^+ , свидетельствует о том, что первым актом, необходимым для десорбции O^+ , является ионизация одного из этих уровней.

В отличие от свободных атомов, для ионизации которых необходимо перенести электрон на бесконечность (на так называемый уровень вакуума), в твердом теле электрону достаточно сообщить энергию, соответствующую нижнему уровню зоны проводимости. Зона проводимости представляет собой совокупность большого числа разрешенных электронных состояний, возникающих при образовании конденсированной среды. Одновременно с этим формируется другая зона состояний, заполненная валентными электронами, которую называют валентной зоной. В идеальном кристалле диэлектрика или полупроводника, в промежутке между валентной зоной и зоной проводимости разрешенных электронных состояний нет, поэтому он называется запрещенной зоной. Помимо этих зон одной из важнейших характеристик электронной структуры твердого тела является положение уровня, ниже которого при $T = 0 \text{ K}$ электронные состояния запол-

нены, а более высокие свободны. Впервые этот уровень введен известным физиком Энрико Ферми, поэтому его называют уровнем Ферми.

Начнем с объяснения процесса десорбции, происходящей при энергиях электронов, больших 33,6 эВ. При таких энергиях становится возможной ионизация уровней $\text{Ti}(3p)$ (стрелка 1 на рис. 3). Наиболее вероятным процессом снятия возбуждения является внутриатомный переход электрона с вышележащего уровня Ti на образовавшуюся дырку. Однако TiO_2 – соединение с максимальной степенью окисления, поэтому атомы титана лишены валентных электронов, которые сосредоточены вблизи атомов кислорода (на рис. 3 эти области показаны более темным цветом). В этом случае происходит межатомный электронный переход – электрон с одного из валентных уровней $\text{O}(2p)$ заполняет дырку на $\text{Ti}(3p)$ -уровне (стрелка 2 на рис. 3). При этом ион O^{2-} , лишившись одного электрона, превращается в однозарядный ион O^+ .

При электронном переходе $\text{O}(2p) \rightarrow \text{Ti}(3p)$ выделяется энергия, равная разности энергий этих уровней. При этом либо испускается фотон, либо энергия непосредственно передается электронам, находящимся на более высоких уровнях. Если реализуется второй случай, то может произойти одно- или двукратная ионизация кислородного иона (стрелки 3 на рис. 3). Этот процесс, открытый Пьером Оже в 1927 году, называется оже-процессом.

Таким образом, отрицательный ион кислорода O^{2-} в конечном итоге оказывается либо нейтральным атомом, либо положительным ионом O^+ . В первом случае кулоновские силы, удерживающие O^{2-} в кристалле, исчезают, а во втором из-за того, что O^+ оказывается окруженным положительными ионами титана, появляются силы, выталкивающие положительный ион кислорода с поверхности. В результате может произойти десорбция как нейтрального атома, так и положительного иона кислорода.

При ионизации налетающим электроном уровня $\text{O}(2s)$ может произойти внутриатомный переход $\text{O}(2p) \rightarrow \text{O}(2s)$, приводящий к тем же последствиям (штриховые стрелки на рис. 3). Как видно из рис. 3, выделившаяся энергия будет меньше по сравнению с межатомным переходом. Поэтому десорбция O^+ в области энергий электронов (21,8–33,6) эВ должна быть менее эффективной. Это предсказание находится в хорошем согласии с данными, представленными на рис. 2.

Модель, предложенная Кнотеком и Файбельманом, применима и для объяснения ЭСД положительных ионов галогенов с поверхностями ШГК.

В отличие от TiO_2 для образования положительного иона достаточно, чтобы в ходе оже-процесса произошла лишь однократная ионизация галогена.

Однако, несмотря на свою привлекательность, рассмотренная модель не может объяснить многих экспериментальных фактов, полученных при

изучении электронно-стимулированной десорбции с поверхностей щелочно-галогидных кристаллов.

Поэтому, по мнению большинства исследователей, для таких объектов (по крайней мере, для объяснения закономерностей эмиссии нейтральных частиц) более предпочтительна другая модель, в основе которой лежат механизмы стимулированного электронами дефектообразования в ШГК, предложенные Ч.Б. Лушиком, Д. Пули и Х.Н. Хершем в 1966 году [4].

ЭКСИТОННАЯ МОДЕЛЬ ЭСД

Согласно этой модели, для десорбции атома галогена необходимо создание совсем другого электронного возбуждения – экситона, представляющего собой водородоподобное, связанное кулоновским взаимодействием состояние (связанную электронно-дырочную пару). Для образования экситона требуется энергия несколько меньшая, чем энергия, необходимая для ионизации электронного уровня в твердом теле. Так, при возбуждении низкоэнергетических экситонов (на отрицательных ионах кристалла) с участием электронов валентной зоны значение этой энергии лежит в пределах 7,7–7,8 эВ, в то время как ширина запрещенной зоны равна 8,7 эВ.

Рассмотрим упрощенную схему процессов, приводящих к электронно-стимулированной десорбции атома галогена с поверхности ШГК.

На рис. 4 показано расположение анионов (ионов галогена X^-) и катионов (ионов металла A^+) в одной из плоскостей кристалла. Пусть налетающий электрон создает электронно-дырочную пару на анионе. Этот момент отражен на рис. 4, а, на котором возбужденная область обозначена штриховкой. В результате кулоновского взаимодействия в этом месте решетка кристалла деформируется таким образом, что расстояние между двумя соседними анионами уменьшается. Их сближение приводит к образованию возбужденного молекулярного иона X_2^{2-*} (рис. 4, б), занимающего два узла решетки. Одновременно с этим возникает так называемый моле-

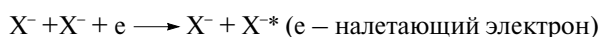
кулярный экситон X_2^{2-*} , одним из компонентов (дырочным) которого является ион X_2^{2*} , а вторым (электронным) – “лишний” электрон. Через некоторое время молекулярный ион X_2^{2*} диссоциирует на нейтральный атом галогена X_0 и отрицательный ион X^- . При этом атому X_0 передается импульс вдоль направления, указанного стрелкой. Он внедряется в узел соседа, в результате чего образуется молекулярный ион X_2^- , занимающий один узел решетки и ориентированный по стрелке (рис. 4, в). Такого рода дефекты называются Н-центрами. Н-центр распадается на X_0 и X^- , вновь X_0 получает импульс в том же направлении и т.д. до тех пор, пока цепочка не пересечет поверхность и не произойдет десорбция атома галогена (рис. 4, г). Так как движение происходит в одном направлении, цепочку называют цепочкой сфокусированных замещений.

Как видно из рис. 4, в, вторая составляющая экситона – электрон (e) остается на узле, который раньше занимал смещенный анион. Такое образование, которое можно представить как вакансию аниона с захваченным электроном, называют F-центром. Название происходит от слова *farben* (окрашивать) и вполне оправданно, так как генерация подобных дефектов приводит к изменению цвета, то есть к окрашиванию кристаллов.

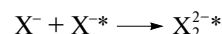
Образование F–Н-центров и процессы, приводящие к десорбции аниона, можно коротко изобразить цепочками последовательных событий.

1. Образование F-центра

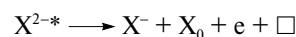
Генерация электронного возбуждения на анионе (X^{*-})



Образование молекулярного экситона



Распад экситона



(значком \square обозначена возникающая вакансия)

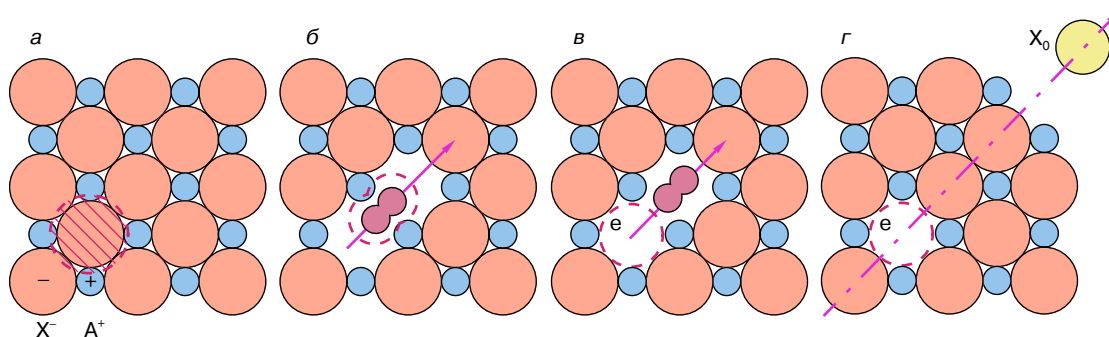
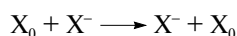


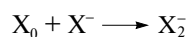
Рис. 4. Расположение анионов X^- и катионов A^+ в одной из плоскостей ШГК. Последовательность событий, заканчивающаяся десорбцией нейтральных атомов галогена: а – генерация электронно-дырочной пары, б – образование молекулярного экситона, в – распад экситона с образованием F- и Н-центров, г – десорбция атома галогена (X_0)

2. Десорбция

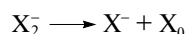
Движение нейтрала (X_0)



Образование Н-центра



Распад Н-центра



и т.д. до пересечения цепочки с поверхностью.

Одним из важных достоинств рассмотренной модели является то, что в отличие от модели Кнотек-Файбельмана она объясняет многие закономерности ЭСД нейтральных атомов галогенов с поверхностями ЩГК, в том числе и преимущественный выход частиц в одном направлении (направлении, соответствующем плотной упаковке ионов галогена).

В двух последних случаях речь шла об ЭСД только анионного компонента. Однако экспериментально установлено, что при не очень низких температурах (> 200 К) с поверхностями ЩГК эмитируются и катионы. Коротко изложим некоторые из существующих представлений о механизме этого явления, которые базируются на рассмотренной выше экситонной модели Лушика-Пули-Херша.

ЭСД АТОМОВ МЕТАЛЛА С ПОВЕРХНОСТЯМИ ЩГК

Как мы только что видели, электронное облучение приводит к образованию F-центров, представляющих собой анионные вакансии с захваченными электронами. Существует большая вероятность того, что захваченный электрон окажется связанным с одним из ближайших катионов. В результате образуется нейтральный атом металла, слабо связанный с решеткой. Если это происходит на поверхности, то нейтрализованный катион может быть десорбирован. Для заметной эмиссии атомов металла необходимо пополнение поверхностных слоев кристалла F-центрами. Это осуществляется за счет диффузии F-центров из объема к поверхности. На самом деле происходит, конечно же, диффузия атомных частиц, а не вакансий, но для описания многих процессов удобнее использовать концепцию диффузии дефектов. Скорость диффузии повышается с увеличением температуры, поэтому вполне закономерно, что с ростом температуры наблюдается и рост интенсивности десорбции металлических атомов. Однако не все нейтрализованные на поверхности катионы успевают десорбироваться. Некоторые из них, мигрируя по поверхности, объединяются в более крупные металлические частицы, испарение из которых начинается при более высоких температурах. Подобные образования можно наблюдать с помощью одного из самых удивительных приборов сегодняшнего дня — атомно-силового микроскопа, который мо-

жет “чувствовать” силы взаимодействия между отдельными атомами.

В качестве примера на рис. 5 показано изображение облученной электронами поверхности флюорита CaF_2 [5]. Это соединение по отношению к электронам ведет себя во многом так же, как и ЩГК, поэтому в процессе электронной бомбардировки на его поверхности образуются островки кальция, которые хорошо видны на рисунке.

Существуют, конечно, и другие подходы к объяснению десорбции металлических атомов, стимулированной электронами. Однако приведенный здесь механизм представляется наиболее простым и наглядным.

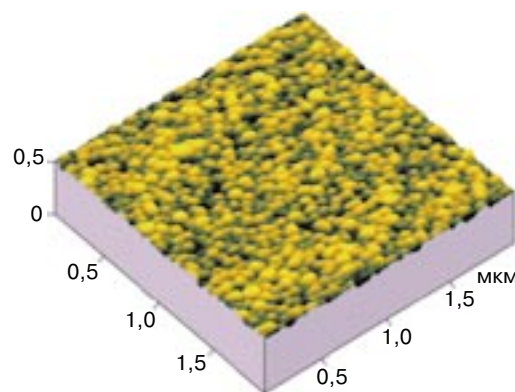


Рис. 5. Островки металлического кальция, образовавшиеся на поверхности CaF_2 в процессе электронного облучения. Изображение получено в атомно-силовом микроскопе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье сделана попытка в доступной и наглядной форме рассказать о том, каким образом, казалось бы, безобидные электроны с низкими энергиями приводят к разрушению поверхности твердых тел.

В некоторых случаях эти процессы протекают настолько интенсивно, что с ними приходится считаться не только в научных исследованиях, но и на практике. Например, повреждение поверхности некоторых галогенидов, широко используемых в различных устройствах, происходит так же быстро, как и при бомбардировке тяжелыми ионами.

Для объяснения этих явлений были привлечены три основных механизма электронно-стимулированной десорбции, предложенные более 20 лет назад. С тех пор наши знания о поверхностных процессах стали намного шире и глубже. Наибольшие успехи достигнуты в последние годы, что стало возможным благодаря использованию новых (туннельная и атомно-силовая микроскопия) и совершенствованию существовавших методов исследования

поверхности. С их помощью удалось непосредственно наблюдать изменения на поверхности, вносимые электронами, изучить пространственные и энергетические распределения эмитированных частиц, что позволило внести существенные коррективы в наши представления о механизмах ЭСД. Возник вполне оправданный интерес к техническим приложениям, которые могут быть реализованы на основе этого явления. Так, в настоящее время делаются попытки использовать электронно-стимулированную десорбцию для создания прецизионных источников вещества, которое накапливается в приповерхностном слое за счет преимущественной десорбции одного из компонентов. В то же время оказалось, что оставляемый электронным пучком след на поверхности может быть пригодным для записи информации с высокой степенью плотности. Однако первые открытия всегда самые важные. Поэтому трудно переоценить вклад авторов рассмотренных в статье моделей в эту область знаний.

Более полную информацию о процессах, приводящих к разрушению твердых тел медленными электронами, читатели смогут найти в двух прекрасных

монографиях [3, 4], а также в цитируемой там литературе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зенгуил Э.* Физика поверхности. М.: Мир, 1990. 536 с.
2. *Кикоин И.К., Кикоин А.К.* Физика: Учеб. для 8-го кл. сред. шк. 9-е изд. М.: Просвещение, 1988. 238 с.
3. *Вудраф Д., Делчар Т.* Современные методы исследования поверхности. М.: Мир, 1989. 568 с.
4. *Лущик Ч.Б., Лущик А.Ч.* Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах. М.: Наука, 1989. 263 с.
5. *Еловигов С.С., Тажиева Г.Р., Сушкова Ю.В. и др.* // Поверхность. Физика, химия, механика. 1998. № 1. С. 94–101.

* * *

Сергей Сергеевич Еловигов, кандидат физико-математических наук, доцент МГУ. Область научных интересов – тонкие пленки, электронная спектроскопия, взаимодействие электронов с веществом. Соавтор более 100 научных публикаций и двух учебных пособий.