

Адсорбция европия на поверхности вольфрама с различной степенью окисления

© В.Н. Агеев, Е.Ю. Афанасьева

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Afanaseva@ms.ioffe.rssi.ru

(Поступила в Редакцию 21 августа 2000 г.)

Методами термодесорбционной спектроскопии и Оже-электронной спектроскопии исследована кинетика адсорбции европия на грани W(100) с различной степенью окисления. Термодесорбционный спектр атомов Eu с грани W(100) состоит из трех последовательно заполняющихся фаз десорбции, энергия активации десорбции в которых уменьшается от 3 до 2.1 eV с ростом степени покрытия. Термодесорбционный спектр атомов Eu с грани W(100), покрытой моноатомной пленкой кислорода, содержит пять последовательно образующихся фаз десорбции, причем энергия активации десорбции в высокотемпературной фазе увеличивается до 4 eV. Окисленный W восстанавливается европием, и десорбция окислов W заменяется десорбцией окисла EuO. Адсорбированная пленка Eu на вольфраме после заполнения монослоя растет в виде трехмерных кристаллитов. С увеличением степени окисления W уменьшается неоднородность роста пленки Eu, и на объемных окислах W растет сплошная пленка Eu, полностью экранирующая Оже-сигнал вольфрама.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 99-02-17972) и в рамках Российской государственной программы "Поверхностные атомные структуры" (проект № 4.5.99).

Редкоземельные металлы широко используются в электронике, электротехнике, нефтеперерабатывающей и автомобильной промышленности, а также в космической технике для производства электронных эмиттеров, постоянных магнитов, конструкционной и ВТСП-керамики [1]. Однако сведения об их адсорбционных характеристиках на поверхности тугоплавких металлов весьма ограничены [2–7], а на поверхности окислов тугоплавких металлов — отсутствуют. В настоящей работе мы исследовали адсорбцию европия (Eu) на поверхности окисленного вольфрама методами термодесорбционной спектроскопии (ТДС) и электронной Оже-спектроскопии (ЭОС). Ранее мы изучали электронно-стимулированную десорбцию (ЭСД) атомов Eu из слоя Eu, адсорбированного на окисленном вольфраме [8].

1. Экспериментальная техника

Измерения проводились методами ТДС и ЭОС, детали которых описаны в [9,10]. Регистрация продуктов термодесорбции осуществлялась с помощью импульсного времяпролетного масс-спектрометра. Поток атомов Eu определялся по току ионов Eu^+ , которому в масс-спектре соответствовала массовая линия 152, а поток молекул окисла EuO измерялся по току ионов EuO^+ , которому в масс-спектре соответствовала массовая линия 168.

Оже-спектры регистрировались с помощью 120-градусного квазисферического энергоанализатора с задерживающим электрическим полем. Количество Eu определялось по интенсивности Оже-линии $N_{45}O_{23}N_{67}$ с энергией 109 eV, а интенсивность пика прямой рекомбинации $4d-4f$ с энергией 139 eV использовалась для выяс-

нения степени окисления Eu [11]. Экранировка вольфрама европием измерялась по изменению Оже-линии вольфрама N_5N_6V с энергией 169 eV. Энергия первичных электронов составляла 1.3 keV, а плотность тока не превышала $1.3 \cdot 10^{-3}$ A/cm². В качестве подложек использовались текстурированные вольфрамовые ленты с преимущественным выходом на поверхность грани (100), имеющие размер $0.01 \times 1.0 \times 30$ mm. Очистка лент от углерода осуществлялась по стандартной методике путем отжига в кислороде при давлении 10^{-6} Torr и при температуре ленты ~ 1600 K в течение нескольких часов.

Окисление W-лент проводилось в двух режимах: 1) ленты выдерживались в кислороде при давлении $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ Torr и $T = 1600$ K в течение 10 min (при этом на поверхности W образуется моноатомная пленка кислорода [12], а также присутствует небольшое количество поверхностных окислов W); 2) окисление проводилось при давлении кислорода $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ Torr и $T = 1000$ K в течение различных времен (при этом растут объемные окислы W [12]).

Источник атомов Eu был изготовлен из заваренной с обоих торцов танталовой трубки с толщиной стенки 0.05 mm, диаметром 3 mm и длиной 30 mm, в которую европий помещался непосредственно перед откачкой прибора. Вдоль длины трубки было сделано семь отверстий диаметром 0.3 mm, чтобы обеспечить равномерность потока атомов Eu на поверхность W-ленты. Источник нагревался пропусканием постоянного электрического тока. Время разогрева источника до установления стационарного потока атомов Eu составляло около 10 min. Использовались два режима напыления атомов Eu: 1) источник разогревался 10 min, затем W-лента очищалась прогревом до $T = 2400$ K и ее температура понижалась до температуры адсорбции Eu,

после адсорбции температура ленты повышалась, и регистрировались продукты десорбции; 2) вольфрамовая лента очищалась высокотемпературным прогревом, затем включался источник Eu, производилось напыление, источник атомов европия выключался, и производилась запись Оже-спектра или высокотемпературная вспышка с измерением потока десорбирующихся частиц. В первом режиме зависимость количества напыленного Eu от времени напыления была линейной, во втором — нелинейной, причем скорость напыления увеличивалась по мере разогрева источника Eu.

W-лента и источник Eu крепились на манипуляторе, который позволял перемещать образец между входом в источник масс-спектрометра и входом в энергоанализатор. Скорость нагрева ленты можно было изменять от 20 до 2000 K/s, причем зависимость температуры от времени была близка к линейной. Отклонение от линейности в интервале температур 600–2000 K не превышало 50 K. В области высоких температур температуру ленты измеряли с помощью оптического микропирометра, а в области низких — путем линейной экстраполяции зависимости температуры ленты от тока накала к комнатной температуре. Давление остаточных газов в приборе составляло около 10^{-10} Торр.

2. Результаты измерений

а) Термодесорбция Eu с W(100). На рис. 1 приведены термодесорбционные спектры атомов Eu с W(100) для различных степеней покрытия. Степень покрытия выражена в единицах $\theta_s = N_{\text{ads}}/N_s$, где N_{ads} — число адатомов Eu, N_s — поверхностная концентрация атомов W на грани (100) ($\sim 10^{15}$ at./cm²). Видно, что с увеличением покрытия на кривых десорбции появляются три максимума, свидетельствующие о наличии трех фаз десорбции атомов Eu с грани W(100). Две высокотемпературные фазы десорбции с ростом степени покрытия насыщаются, а низкотемпературная фаза насыщения не обнаруживает. Аналогичное поведение термодесорбционных спектров атомов Eu с грани W(100) ранее было обнаружено в работе [3], в которой поток атомов Eu был измерен по величине тока поверхностной ионизации. Концентрация атомов Eu, соответствующая насыщению первой высокотемпературной фазы, оказалась равной $5 \cdot 10^{14}$ at./cm² и была связана с образованием монослоя. Соответственно заполнение низкотемпературной фазы начинается при степени покрытия $\theta_s > 0.75$. Поскольку наклон фронта этой фазы не зависит от степени покрытия, а количество европия в этой фазе неограниченно увеличивается с ростом экспозиции, можно полагать, что она имеет нулевой порядок кинетики десорбции [13,14] и является результатом десорбции европия из трехмерных образований. Для этой фазы десорбции на рис. 2 изображен график зависимости $\ln(dN/dt)$ от T^{-1} . График хорошо аппроксимируется прямой линией, из наклона которой была определена энергия активации десорбции атомов Eu в этой фазе $E = 2.1 \pm 0.2$ eV, которая несколько выше теплоты сублимации европия 1.84 eV [15].

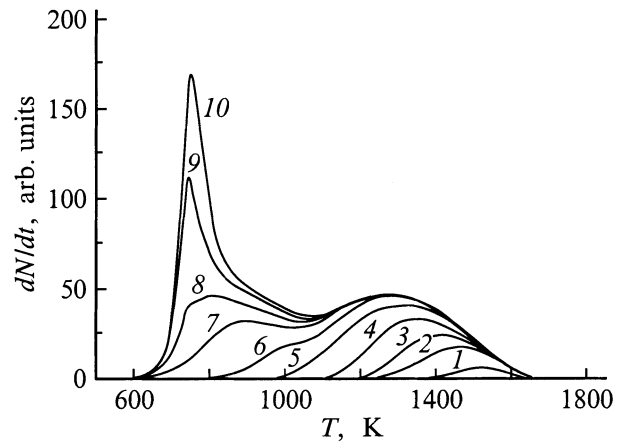


Рис. 1. Термодесорбционные спектры атомов Eu с W для различных значений начальной степени покрытия θ_s : 1 — 0.03, 2 — 0.1, 3 — 0.15, 4 — 0.25, 5 — 0.4, 6 — 0.5, 7 — 0.7, 8 — 0.82, 9 — 1.0, 10 — 1.1. Температура адсорбции $T = 300$ K, скорость нагрева $200 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$.

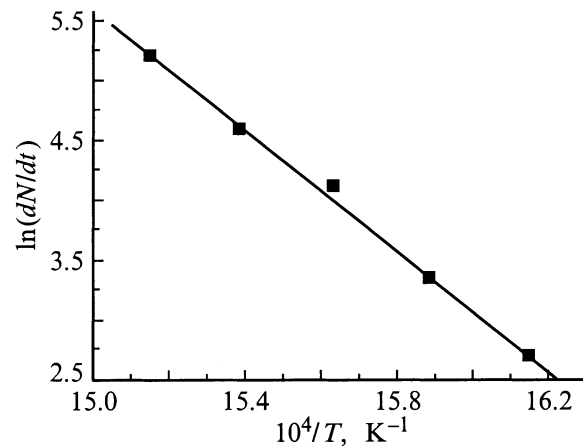


Рис. 2. Зависимость $\ln(dN/dt)$ от T^{-1} для начальной степени покрытия вольфрама европием $\theta_s = 1.3$.

Из рис. 1 следует, что количество атомов Eu в первой высокотемпературной фазе в 2 раза больше, чем во второй, что не соответствует данным [3]. Возможно, это вызвано тем, что в работе [3] адсорбция европия осуществлялась при температурах выше 700 K.

Рис. 3 иллюстрирует графики зависимостей $\ln((dN/dt)/N)$ от T^{-1} для термодесорбции атомов Eu с W(100) для различных начальных степеней покрытия поверхности европием θ_s . Для $\theta_s \leq 0.03$ график аппроксимируется прямой, из наклона которой была найдена энергия активации десорбции $E = 3.0 \pm 0.2$ eV. Эта величина совпадает с величиной, найденной с помощью метода модуляции температуры [2], и величиной, вычисленной в предположении, что европий на W находится в трехвалентном состоянии [16], а также с величиной, измеренной методом ТДС для грани W(110) [17]. С другой стороны, она заметно ниже

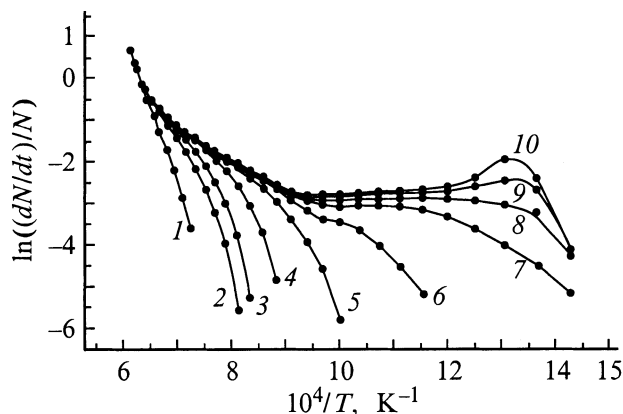


Рис. 3. Зависимости $\ln((dN/dt)/N)$ от T^{-1} для различных значений начальной степени покрытия θ_s : 1 — 0.03, 2 — 0.1, 3 — 0.15, 4 — 0.25, 5 — 0.4, 6 — 0.5, 7 — 0.7, 8 — 0.82, 9 — 1.0, 10 — 1.1.

величины $E = 4.42$ eV, полученной методом изобар адсорбции [3].

При $\theta_s > 0.03$ на графиках становится заметным перегиб, свидетельствующий о наличии латеральных взаимодействий в адслое. При $\theta_s > 0.5$ на графиках появляется участок, параллельный оси абсцисс, за которым при $\theta_s > 1$ наблюдается максимум. По-видимому, появление максимума вызывается образованием низкотемпературной фазы.

б) Термодесорбция Eu с окисленного вольфрама. На рис. 4 представлены термодесорбционные спектры атомов Eu с грани W(100), покрытой моноатомной пленкой кислорода, для различных начальных степеней покрытия поверхности европием при $T = 300$ K. С увеличением покрытия наблюдается последовательное заполнение пяти термодесорбционных фаз, причем высокотемпературная фаза смещена примерно на 400 K в область больших температур по сравнению с первой высокотемпературной фазой десорбции Eu с вольфрама, что свидетельствует об увеличении энергии связи европия на моноатомной пленке кислорода на вольфраме W-O. При $\theta_s \leq 0.1$ энергия активации десорбции атомов Eu с W-O оказалась $E = 4.0 \pm 0.2$ eV, т.е. на 1 eV выше, чем с вольфрама. Наиболее низкотемпературная фаза десорбции европия является результатом десорбции из конденсированного состояния.

Следует отметить, что десорбцию окислов европия можно было зарегистрировать, только подняв чувствительность метода повышением в 5 раз скорости нагрева при вспышке. При этом количество десорбирующегося EuO составляло несколько процентов от количества Eu, десорбирующегося в высокотемпературной фазе с W-O. Причем если до напыления Eu при нагреве моноатомной пленки кислорода на W наряду с десорбцией кислорода наблюдалась десорбция незначительного количества окислов вольфрама, то после напыления Eu десорбция окислов вольфрама не наблюдалась, а регистрировалась десорбция примерно равного количества EuO.

Энергия активации десорбции для EuO, найденная из зависимости $\ln]((dN/dt)/N)$ от T^{-1} , оказалась равной $E = 4.1 \pm 0.2$ eV.

Европий, напыленный на W-ленту при 300 K, окисляется в атмосфере кислорода при давлении $3 \cdot 10^{-7}$ Торг и температуре $T = 700$ K в течение нескольких минут. Об этом свидетельствует появление молекул EuO в термодесорбционном спектре, причем пик молекул EuO смещен относительно высокотемпературного пика десорбции атомов Eu с W-O в область низких температур на несколько десятков градусов (рис. 4).

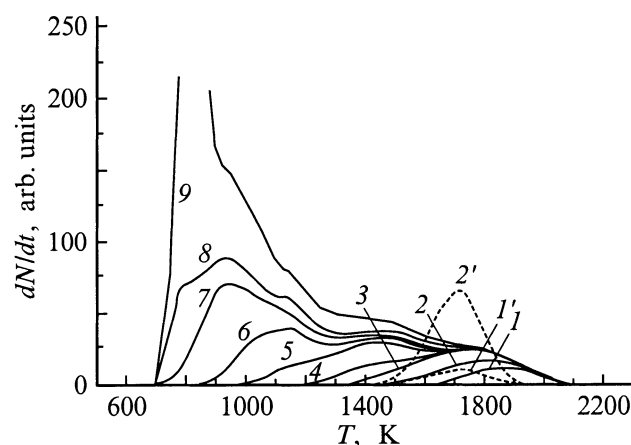


Рис. 4. Термодесорбционные спектры атомов Eu с W, покрытого моноатомной пленкой кислорода, для различных значений начальной степени покрытия θ_s : 1 — 0.1, 2 — 0.2, 3 — 0.4, 4 — 0.45, 5 — 0.75, 6 — 1.05, 7 — 1.5, 8 — 1.9, 9 — 3.5. $T = 300$ K. Штриховые линии — термодесорбционные спектры EuO после окисления при $T = 700$ K в течение 5 min предварительно напыленной на W пленки Eu до концентрации θ_s : 1' — 0.4, 2' — 1.05. Скорость нагрева 200 K \cdot s $^{-1}$.

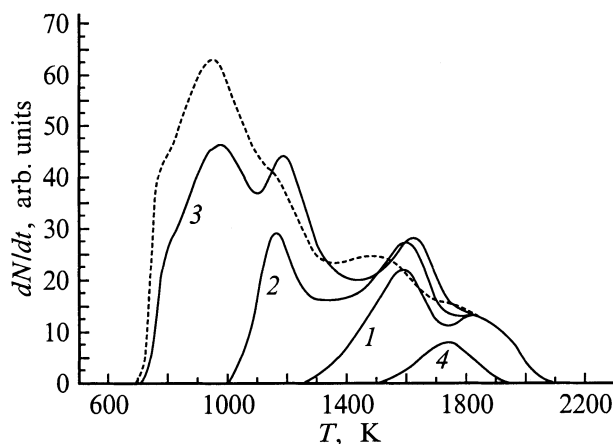


Рис. 5. Термодесорбционные спектры атомов Eu с окисленного W для различных времен напыления европия. t (min): 1 — 6, 2 — 8, 3 — 10. 4 — одновременная десорбция EuO для напыления Eu в течение 8 min. Штриховая линия — термодесорбционный спектр атомов Eu с W, покрытого моноатомной пленкой кислорода (время напыления европия $t = 8$ min). Скорость нагрева 200 K \cdot s $^{-1}$.

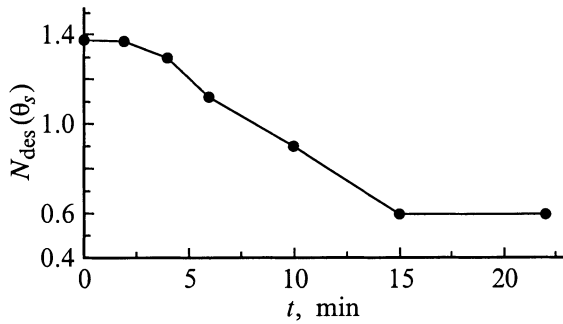


Рис. 6. Зависимость количества атомов Eu, десорбирующихся с окисленного W, от времени предварительного окисления для одинаковой начальной дозы напыления европия $\theta_s = 1.38$. Окисление проводилось при давлении кислорода $P = 3 \cdot 10^{-6}$ Торр и $T = 1000$ K.

На рис. 5 представлены термодесорбционные спектры Eu, напыленного на пленку объемных окислов вольфрама. Спектры в этом случае сохраняют пятифазную структуру. Наблюдаются небольшое смещение максимумов некоторых фаз и изменение их сорбционной емкости. При этом регистрируется уже заметное количество десорбирующихся молекул EuO.

Количество десорбирующихся при вспышке атомов Eu уменьшается с увеличением времени предварительного окисления вольфрама при одинаковой дозе напыления Eu (рис. 6). Это уменьшение нельзя объяснить только одновременной десорбцией EuO, и оно не зависит от температуры подложки в интервале $300 < T < 600$ K. По-видимому, этот эффект связан с уменьшением коэффициента прилипания Eu после окисления вольфрама. Подобный эффект снижения адсорбционной активности Ir по отношению к Yb наблюдался в работе [2] после окисления Ir.

с) Адсорбция европия на вольфраме и окисленном вольфраме. На рис. 7 приведены зависимости интенсивностей Оже-сигналов Eu (109 eV) и W (169 eV) от дозы напыленного Eu в θ_s . Напыление велось на чистый W (кривые 1 и 4), на W-O (кривые 2 и 5) и на окисленный вольфрам (кривые 3 и 6). Оже-сигнал Eu растет линейно во всех случаях до $\theta_s = 0.75$, что соответствует, по-видимому, заполнению первого слоя. Кривые 1–3 стремятся к насыщению (или в область медленного изменения Оже-сигналов) при разных значениях сигнала в зависимости от степени окисления подложки. Следует отметить, что если кривые 1 и 2 до $\theta_s = 1.5$ практически совпадают, то кривая 3 отличается уже при минимальных значениях θ_s , причем сначала интенсивность Оже-сигнала европия, напыленного на чистый W, превышает интенсивность Оже-сигнала Eu, напыленного на окисленный W. Затем наблюдается обратная ситуация. Такое расхождение нельзя однозначно связать с изменением механизма роста пленки Eu, поскольку необходимо учитывать такие факторы, как изменение формы Оже-линии Eu на окисленном вольфраме и уменьшение

коэффициента прилипания Eu с увеличением степени окисления W.

Изменение интенсивности Оже-сигнала W в зависимости от дозы напыленного Eu также свидетельствует в пользу того, что конечное состояние пленки Eu зависит от степени окисления W. Полная экранировка вольфрама пленкой напыленного Eu достигается лишь в случае напыления Eu на окисленный вольфрам (кривая 6). В случае напыления Eu на W или на W с монокристаллическим покрытием кислородом зависимости интенсивности Оже-сигнала W выходят на насыщение, причем величина сигнала в насыщении в случае напыления на чистый W выше. Можно предположить, что при $T = 300$ K после заполнения монослойной пленки с $\theta_s = 0.75$ поверхность начинается рост трехмерных кристаллитов Eu. При напылении Eu на чистый W неоднородность растущей пленки больше, чем при напылении Eu на W-O, а Оже-сигнал W при этом экранируется меньше. Только при напылении на окисленный W растущая пленка близка к однородной и происходит полная экранировка вольфрама.

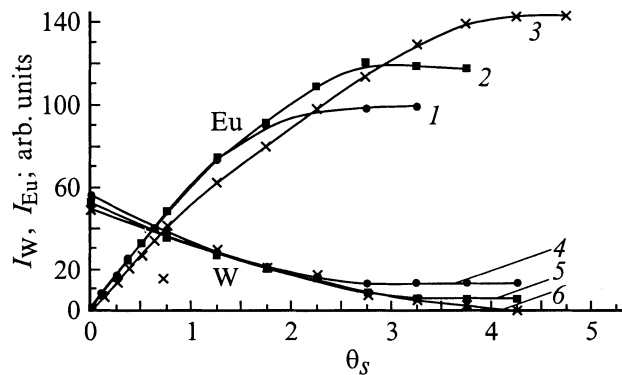


Рис. 7. Зависимости интенсивностей Оже-пиков Eu (1–3) и W (4–6) от дозы напыления Eu. Температура подложки $T = 300$ K. 1, 4 — напыление на W, 2, 5 — напыление на W, покрытый монокристаллической пленкой кислорода, 3, 6 — напыление на окисленный W.

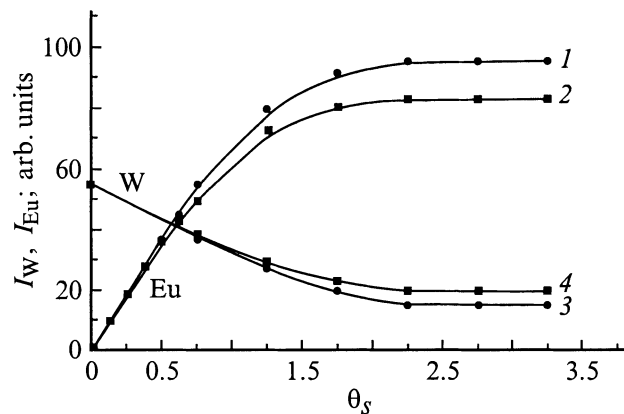


Рис. 8. Зависимости интенсивностей Оже-пиков Eu (1, 2) и W (3, 4) от дозы напыления Eu для различных температур подложки. T (K): 1, 3 — 300, 2, 4 — 500.

На рис. 8 приведены зависимости изменения интенсивностей Оже-сигналов Eu и W при напылении Eu на чистый W при разных температурах (300 и 500 К). Видно, что до $\theta_s = 0.5$ кривые, измеренные при разных температурах, совпадают, затем наблюдается расхождение, и зависимости интенсивностей Оже-сигналов как Eu, так и W в конечном состоянии выходят на насыщение. Интенсивность Оже-сигнала Eu в насыщении уменьшается с ростом температуры, а для W увеличивается с ростом T . Поскольку десорбция Eu при $T = 500$ К незначительна, можно предположить, что площадь занимаемая кристаллитами, уменьшается с ростом T .

Форма Оже-сигнала Eu зависит от его химического состояния [11]. Для окисла Eu_2O_3 наблюдается увеличение интенсивности Оже-линии, вызванной процессом прямой рекомбинации $4d-4f$, по сравнению с интенсивностью Оже-линии $N_{45}\text{O}_{23}\text{N}_{67}$ [11]. Отношение интенсивностей линий $N_{45}\text{O}_{23}\text{N}_{67}$ и $4d-4f$ достигает минимального значения при напылении на W монослоя Eu. Однако только при напылении Eu на окисленный вольфрам это отношение приближается к отношению интенсивностей этих линий для окисла.

3. Обсуждение результатов

Оже-сигнал Eu на вольфраме растет линейно с увеличением покрытия до $\theta_s = 0.75$ (рис. 7), что соответствует концентрации европия $N = 7.5 \cdot 10^{14}$ at./cm². Можно считать, что до $\theta_s = 0.75$ происходит заполнение первого слоя. На термодесорбционных спектрах атомов Eu с W при $\theta_s = 0.75$ завершается заполнение двух высокотемпературных фаз десорбции. Значение $N = 7.5 \cdot 10^{14}$ at./cm² близко к концентрации атомов Eu ($N = 6.94 \cdot 10^{14}$ at./cm²) в плотноупакованной гексагональной структуре с металлическим атомным радиусом Eu $r = 2.02$ Å. Подобная гексагональная структура наблюдалась для системы Eu-W(110) [17]. Гексагональные и псевдогексагональные плотноупакованные структуры в монослое регистрировались при $T = 300$ К для ряда редкоземельных элементов на гранях тугоплавких переходных металлов с различной ориентацией: Gd-W(110), Tb-W(110) [17]; Yb-Mo(110), Sm-Mo(110) [18]; Sm-W(100) [6]; Yb-Mo(112) [19]. Причем формирование плотноупакованных структур обычно сопровождается резким уменьшением теплоты адсорбции.

Можно предположить, что до покрытий $\theta_s = 0.5$ (чему на термодесорбционных спектрах соответствует заполнение высокотемпературной фазы десорбции) Eu адсорбируется на W(100), образуя простые, согласованные с подложкой структуры. (В случае адсорбции Sm на W(100) при $\theta_s \leq 0.5$ наблюдалась структура $c(2 \times 2)$ [6].) Энергия активации десорбции атомов Eu с W(100) при малых покрытиях $\theta_s \leq 0.03$ составляет $E = 3.0 \pm 0.2$ eV. При увеличении θ_s максимумы термодесорбционных спектров в пределах высокотемпературной фазы смещаются в область низких температур,

а зависимости $\ln((dN/dt)/N)$ от T^{-1} при этом уже не аппроксимируются прямыми, что является следствием латеральных взаимодействий адатомов: непрямого взаимодействия через электроны проводимости подложки и диполь-дипольного взаимодействия между электроположительными атомами Eu. Появление второй высокотемпературной фазы десорбции связано, по-видимому, с началом формирования в адслое плотноупакованной гексагональной структуры. На этой стадии вследствие сжатия решетки адатомов происходит изменение взаимодействия между адатомами Eu от диполь-дипольного и непрямого к прямому обменно. В работе [20] уменьшение теплоты адсорбции было связано с переходом электронов с локализованных $4f$ -состояний в s -зону.

После заполнения монослоя начинается рост трехмерных кристаллитов Eu уже при $T = 300$ К. С увеличением температуры адсорбции от 300 до 500 К площадь, занимаемая кристаллитами, уменьшается. Энергия активации десорбции из кристаллитов близка к теплоте сублимации Eu и составляет $E = 2.1 \pm 0.2$ eV.

Термодесорбционный спектр атомов Eu с W, покрытого монослоем пленкой кислорода, содержит пять последовательно образующихся фаз десорбции. Оже-сигнал Eu при этом меняется линейно с покрытием вплоть до $\theta_s = 0.75$. Это покрытие соответствует заполнению двух высокотемпературных фаз десорбции Eu с W-O. Как и в случае напыления Eu на W, при нанесении Eu на W-O в монослое образуется плотноупакованная решетка атомов Eu, которые десорбируются в двух фазах. Обе фазы десорбции смещены в область высоких температур по сравнению с системой Eu-W. Энергия активации десорбции при малых покрытиях $E = 4.0 \pm 0.2$ eV, что на 1 eV больше, чем в случае адсорбции Eu на чистом W. При увеличении концентрации Eu сверх монослойной при $T = 300$ К растет пленка из трехмерных кристаллитов, неоднородность которой по толщине меньше, чем у пленки, полученной напылением Eu на чистый W. Eu десорбируется с W, покрытого монослоем пленкой кислорода, в виде атомов. Десорбция окислов EuO наблюдается в случае, когда на поверхности присутствуют окислы W. Если при термодесорбции монослоем покрытия кислорода с W (в отсутствие Eu) наряду с десорбцией кислорода регистрируется десорбция небольшого количества окислов W, то после нанесения Eu окислы W не десорбируются, а наблюдается десорбция соизмеримого количества EuO. При увеличении степени окисления W растет число десорбирующихся молекул EuO (рис. 5). Окислы EuO десорбируются по первому порядку кинетики десорбции с энергией активации $E = 4.1 \pm 0.2$ eV. Первый порядок кинетики десорбции указывает на то, что восстановление поверхностных окислов W и образование EuO происходит до начала десорбции.

Таким образом, в данной работе была изучена адсорбция Eu на W(100) с различной степенью окисления методами ОЭС и ТДС. Показано, что Eu десорбируется с чистого W и W, покрытого монослоем пленкой кисло-

рода, в виде атомов. С окисленного W наблюдается десорбция Eu и EuO. Концентрация атомов Eu в монослое на чистом W и на W, покрытом монокристаллической пленкой кислорода, равна $N = 7.5 \cdot 10^{14} \text{ at./cm}^2$. Монослой десорбируется в двух фазах. При покрытии $\theta_s \leq 0.03$ энергия активации десорбции с чистого вольфрама составляет $E = 3.0 \pm 0.2 \text{ eV}$, а с вольфрама, покрытого монокристаллической пленкой кислорода, $E = 4.0 \pm 0.2 \text{ eV}$. Концентрация атомов Eu в монослое близка к концентрации атомов Eu в плотноупакованной гексагональной решетке. При покрытиях, больших монослойного, при $T = 300 \text{ K}$ на чистом W и на W-O наблюдается рост трехмерных кристаллитов. Причем на W-O растущая пленка более однородна по толщине (размеры кристаллитов меньше). На окисленном W при $T = 300 \text{ K}$ растет сплошная пленка, полностью экранирующая Оже-сигнал W. С увеличением степени окисления W наблюдается уменьшение коэффициента прилипания атомов Eu.

Список литературы

- [1] Г.В. Цыганова, Н.Ю. Пасечник, Н.Н. Смирнова. *Высококичестые вещества* **2**, 43 (1991).
- [2] Б.К. Медведев. Канд. дис. ЛГУ. Л. (1974).
- [3] М.В. Логинов, М.А. Митцев. *ФТТ* **22**, 5, 1411 (1980).
- [4] М.В. Логинов, М.А. Митцев. *ФТТ* **22**, 6, 1701 (1980).
- [5] М.В. Логинов, М.А. Митцев. *Поверхность*, 5, 37 (1987).
- [6] А.П. Казанцев, М.А. Митцев. *ФТТ* **33**, 7, 1986 (1991).
- [7] М.В. Логинов, М.А. Митцев, В.А. Плешаков. *ФТТ* **34**, 10, 3125 (1992).
- [8] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов. *Письма в ЖТФ* **26**, 13, 86 (2000).
- [9] В.Н. Агеев, Е.Ю. Афанасьев. *Поверхность*, 7, 30 (1987).
- [10] В.Н. Агеев, Е.Ю. Афанасьев. *ФТТ* **39**, 8, 1484 (1997).
- [11] W.H. Hocking, J.A.D. Matthew, *J. Phys. Condens. Matter* **2**, 3643 (1990).
- [12] В.Н. Агеев, Н.И. Ионов. *ФТТ* **11**, 11, 3200 (1969).
- [13] G. Zelay, M. Mannerville, R. Kern. *Surf. Sci.* **65**, 261 (1977).
- [14] K. Nagai. *Surf. Sci.* **176**, 193 (1986).
- [15] Е.М. Савицкий, В.Ф. Терехова. *Металловедение редкоземельных металлов*. Наука, М. (1975).
- [16] В.К. Никулин, Н.Д. Потехина. *ФТТ* **20**, 3354 (1978).
- [17] J. Kolaczkiwicz, E. Bauer. *Surf. Sci.* **175**, 487 (1986).
- [18] A. Stenborg, E. Bauer. *Surf. Sci.* **189/190**, 570 (1987).
- [19] I. Ubogyi, S. Stepanovskiy, J. Kolaczkiwicz. *Phys. Rev.* **B61**, 16, 11 097 (2000).
- [20] С.Ю. Давыдов. *ФТТ* **21**, 1842 (1979).