

Электронно-стимулированная десорбция атомов цезия из слоев цезия, осажденных на поверхности вольфрама, покрытого германием

© В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Н.Д. Потехина

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

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

(Поступила в Редакцию 15 ноября 2004 г.)

Времяпролетным методом с помощью детектора на основе поверхностной ионизации измерен выход и энергораспределения атомов Cs из слоев цезия, адсорбированных на вольфраме, покрытом пленкой германия, в зависимости от энергии бомбардирующих электронов, толщины пленки германия, количества адсорбированного цезия и температуры подложки. Порог появления выхода атомов Cs составляет ~ 30 eV, что хорошо коррелирует с энергией ионизации уровня германия $3d$. С ростом энергии электронов выход атомов Cs проходит через широкий максимум при энергии ~ 120 eV. В области толщин пленки германия от 0.5 до двух монослоев обнаружены резонансные пики выхода атомов Cs при энергиях электронов 50 и 80 eV, которые могут быть связаны с энергиями ионизации остовных уровней вольфрама $5p$ и $5s$. С ростом степени покрытия цезия выход атомов Cs проходит через пологий максимум при монослойном покрытии. Энергораспределения атомов Cs имеют вид колоколообразных кривых, которые для тонких пленок германия с ростом покрытия цезия смещаются в область более высоких энергий, а для толстых пленок германия — в область низких энергий. При температуре подложки $T = 160$ K энергораспределения атомов Cs состоят из двух колоколообразных кривых: узкой с максимумом при ~ 0.35 eV, связанной с возбуждением остовных уровней вольфрама, и широкой с максимумом при ~ 0.5 eV, связанной с возбуждением остовного уровня германия $3d$. Полученные результаты можно интерпретировать на основе модели Оже-стимулированной десорбции.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 03-02-17523) и Российской государственной программы „Поверхностные атомные структуры“ (ГК № 1152).

Облучение поверхности твердого тела электронами может приводить к десорбции заряженных и нейтральных частиц в основном и возбужденном состояниях. Десорбция может происходить в результате термического нагрева поверхности облучающим потоком электронов и прямого перехода потенциальной энергии электронного возбуждения поверхности в кинетическую энергию десорбирующихся частиц. В последнем случае это явление называется электронно-стимулированной десорбцией (ЭСД) [1].

К настоящему времени накоплено много данных об ЭСД заряженных частиц, а сведения об ЭСД нейтральных частиц крайне ограничены. Однако в большинстве случаев именно нейтральные частицы являются основной компонентой десорбирующегося потока при ЭСД. Поэтому выяснение закономерностей ЭСД нейтральных частиц особенно важно для понимания механизма этого явления, с которым приходится сталкиваться при работе многих электровакуумных приборов и которое необходимо учитывать для правильного использования методов диагностики поверхности твердого тела, основанных на облучении поверхности электронами [2].

Щелочные металлы широко используются для уменьшения работы выхода термо- и фотоэлектронных эмиттеров, для создания эмиттеров с отрицательным электронным сродством и со спин-поляризованными электронами. Они незаменимы в термоэмиссионных пре-

образователях, ионных двигателях, источниках отрицательных ионов и в качестве промоторов в гетерогенном катализе. В последние годы их применение возросло в связи с выращиванием гетеропереходов и созданием контактов между изоляторами и полупроводниками, а также получением с их участием пленок окислов, соединений азота и других элементов на поверхности полупроводников [3].

Пленки щелочных металлов, адсорбированные на поверхности чистых металлов, весьма устойчивы к ЭСД в связи с малым временем жизни возбужденных состояний в этих системах. Однако нанесение неметаллической пленки даже монослойной толщины между металлической подложкой и адсорбированной пленкой щелочного металла препятствует быстрому обмену электронами между металлической подложкой и пленкой щелочного металла, что значительно увеличивает выход ЭСД щелочных металлов. Такие системы оказались весьма перспективными для изучения механизмов ЭСД атомов щелочных металлов, так как атомы щелочных металлов могут быть с высокой эффективностью ионизованы методом поверхностной ионизации [4].

Мы измерили выход [5–7] и энергораспределения [6,8] для ЭСД атомов щелочных металлов из слоев, адсорбированных на поверхности окисленного вольфрама и молибдена. Было установлено, что ЭСД атомов щелочных металлов связана с образованием дырок на остовных

уровнях $2s$ кислорода [9], распад которых в результате внутриатомного Оже-процесса приводит к нейтрализации адсорбированных ионов щелочных металлов. Выход ЭСД определяется конкуренцией между реионизацией атомов щелочных металлов на положительных ионах кислорода и релаксацией отрицательного заряда ионов кислорода за счет электронов подложки [10].

Для окисленного молибдена обнаружен дополнительный канал ЭСД атомов щелочных металлов, вызванный резонансной ионизацией остовных уровней молибдена [10–12]. С другой стороны, с вольфрама, покрытого пленкой кремния, ЭСД атомов щелочных металлов не наблюдалась, по-видимому, из-за слишком высокой энергии Оже-электронов кремния и соответственно низкой вероятности нейтрализации адсорбированных ионов щелочных металлов [13].

Настоящая работа посвящена измерению выхода и энергораспределений атомов цезия из слоев, адсорбированных на поверхности вольфрама, покрытого пленкой германия. Германий в отличие от кремния имеет первый остовный уровень, расположенный только слегка глубже (~ 30 eV), чем первый остовный уровень кислорода (~ 25 eV). Это позволяет выяснить, в какой мере энергия остовного уровня и специфика изолирующего слоя влияют на величину выхода ЭСД атомов щелочных металлов.

1. Экспериментальная техника

Экспериментальный прибор и методика измерений детально описаны ранее [6]. Отметим лишь некоторые изменения в процедуре измерений, связанные со спецификой настоящей работы.

Измерения выполнялись времяпролетным методом при импульсном облучении мишени электронами. Поток десорбированных положительных ионов задерживался потенциалом, приложенным между мишенью и сеточным электродом в пространстве дрейфа, а нейтральные частицы, преодолевшие участок дрейфа, ионизовались в детекторе на основе поверхностной ионизации, и ионный ток регистрировался с помощью вторичного электронного умножителя.

В качестве мишени использовалась вольфрамовая лента размером $70 \times 2 \times 0.01$ mm, очистка и текстурирование которой проводились по стандартной процедуре. Лента отжигалась при температуре $T = 2000$ K в течение 5 h при давлении остаточных газов $\sim 10^{-9}$ Torr пропуская через нее переменного тока, чтобы вывести на поверхность преимущественно грань (100) [14]. Затем лента прокаливалась при $T = 1800$ K в кислороде при давлении $p(\text{O}_2) = 10^{-6}$ Torr в течение 3 h для удаления примесного углерода. Очистка ленты завершалась после откачки кислорода десорбцией кислорода при $T = 2200$ K в течение 3 min.

Германий напылялся на ленту из прямонакальной вольфрамовой трубки, в которую помещались кусочки германия с концентрацией примеси менее 10^{16} at/cm³.

Трубка располагалась параллельно ленте, и в ней имелись отверстия для равномерного напыления германия вдоль ленты.

Цезий напылялся на ленту при $T = 300$ K потоком атомов, образующимся в прямонакальном испарителе при термическом разложении хромата цезия. Концентрация цезия на поверхности ленты определялась по времени напыления постоянным потоком, а интенсивность потока контролировалась по току поверхностной ионизации ионов Cs^+ , образующихся на ленте детектора поверхностной ионизации, нагретой до температуры, соответствующей насыщению тока поверхностной ионизации. Концентрация цезия в монослой на вольфраме, покрытом пленкой германия, оценивалась как $N_0 \sim 5 \cdot 10^{14}$ at/cm². Эта концентрация соответствует максимуму выхода атомов Cs при ЭСД.

Лента-мишень могла охлаждаться в диапазоне температур 160–300 K путем изменения скорости пропускания через полые тоководы газообразного азота, который предварительно охлаждался в медной трубке, погруженной в жидкий азот. Температура ленты в этом диапазоне определялась из температурной зависимости электрического сопротивления. Нагрев ленты осуществлялся электрическим током, и ее температура измерялась по температурной зависимости тока, которая в области высоких температур устанавливалась с помощью оптического микропирометра, а в области низких температур путем экстраполяции этой зависимости к комнатной температуре. Давление остаточных газов в приборе не превышало $5 \cdot 10^{-10}$ Torr.

2. Результаты

Бомбардировка электронами слоя цезия, адсорбированного при $T = 300$ K на поверхности вольфрама, покрытого пленкой германия, вызывает десорбцию ато-

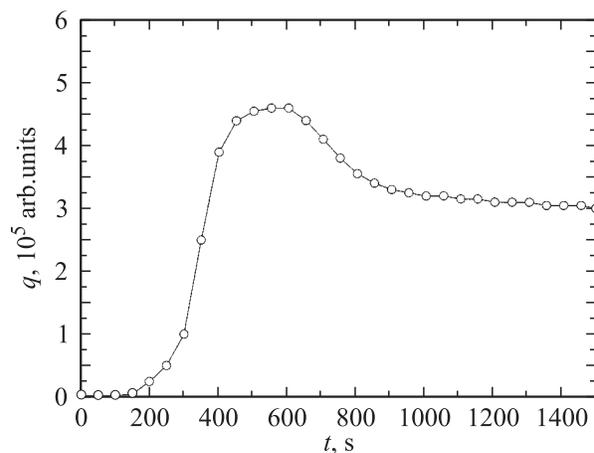


Рис. 1. Выход атомов Cs при ЭСД из монослоя цезия, адсорбированного на пленке германия, в зависимости от времени напыления германия на вольфрам. Температура подложки $T = 300$ K. Энергия электронов $E_e = 120$ eV.

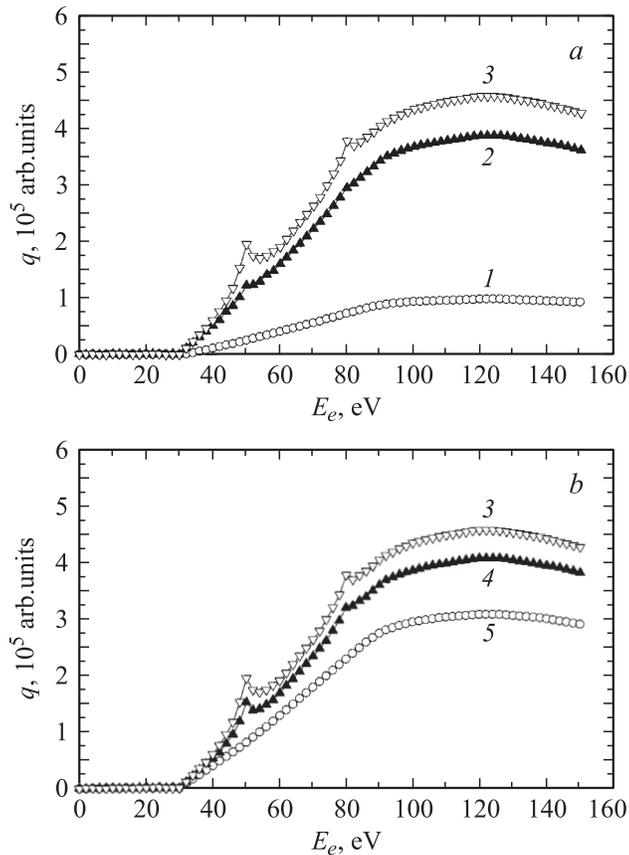


Рис. 2. Выход атомов Cs при ЭСД из монослоя цезия, адсорбированного на пленке германия различной толщины (в монослоях), напыленной на вольфрам, в зависимости от энергии бомбардирующих электронов: 1 — 0.25, 2 — 0.75, 3 — 1.25, 4 — 1.5, 5 — 4.75 (a, b). Температура подложки $T = 300$ К.

мов Cs. Выход атомов Cs зависит от толщины нанесенной пленки германия. На рис. 1 приведен график зависимости выхода атомов Cs из монослойной пленки цезия, напыленной на пленку германия при $T = 300$ К, от времени напыления германия. Задержка в появлении выхода атомов Cs связана с запаздыванием начала испарения германия из источника вследствие инерционности его нагрева. За начальным нелинейным участком следует линейное возрастание выхода атомов Cs со временем напыления германия, что, по-видимому, свидетельствует о стабилизации температуры в источнике германия. Максимальный выход атомов Cs достигается при образовании монослойной пленки германия, а насыщение выхода обеспечивается толщиной пленки германия свыше трех монослоев. В дальнейшем будем использовать термины „тонкая и толстая пленка германия“, понимая под тонкой пленкой германия пленку тоньше одного монослоя, а под толстой пленкой — пленку толщиной больше трех монослоев.

На рис. 2 представлены графики зависимостей выхода q атомов Cs от энергии бомбардирующих электронов E_e для монослойной пленки цезия, адсорбированной

на пленку германия различной толщины при $T = 300$ К. Порог появления выхода атомов Cs не зависит от толщины пленки германия и с учетом работы выхода эмиттера составляет ~ 30 eV. Эта величина близка к энергии ионизации уровня германия $3d$ [15]. Для пленок германия тоньше 0.5 монослоя и толще двух монослоев выход q атомов Cs с ростом E_e растет приблизительно линейно до $E_e \sim 90$ eV, а затем плавно переходит в широкий максимум при $E_e \sim 120$ eV. В промежуточной области покрытий германия на зависимостях $q(E_e)$ наблюдаются резонансные пики при энергиях электронов E_e около 50 и 80 eV. Интенсивность этих пиков проходит через максимум с ростом толщины пленки германия и зависит от покрытия цезия Θ (рис. 3). Пик при $E_e \sim 50$ eV появляется при $\Theta > 0.25$, а пик при $E_e \sim 80$ eV отчетливо виден только при $\Theta > 0.5$. Положение пиков и порог появления выхода атомов Cs не зависят от покрытия цезия, что указывает на независимость энергии электронов от работы выхода мишени.

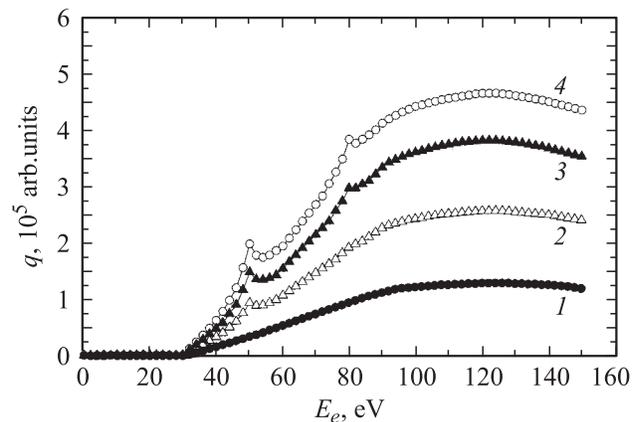


Рис. 3. ЭСД выход атомов Cs из пленки германия монослойной толщины, напыленной на вольфрам и покрытой цезием, в зависимости от энергии бомбардирующих электронов. Степень покрытия цезием (монослой): 1 — 0.25, 2 — 0.50, 3 — 0.75, 4 — 1.0. Температура подложки $T = 300$ К.

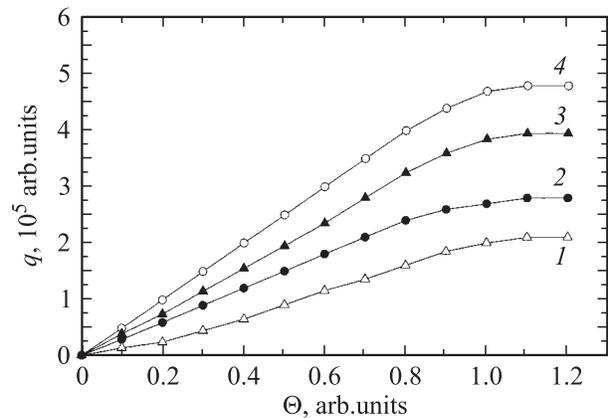


Рис. 4. ЭСД выход атомов Cs в зависимости от степени покрытия цезием пленки германия монослойной толщины, напыленной на вольфрам, для энергий электронов: 1 — 50, 2 — 70, 3 — 80, 4 — 120 eV. Температура подложки $T = 300$ К.

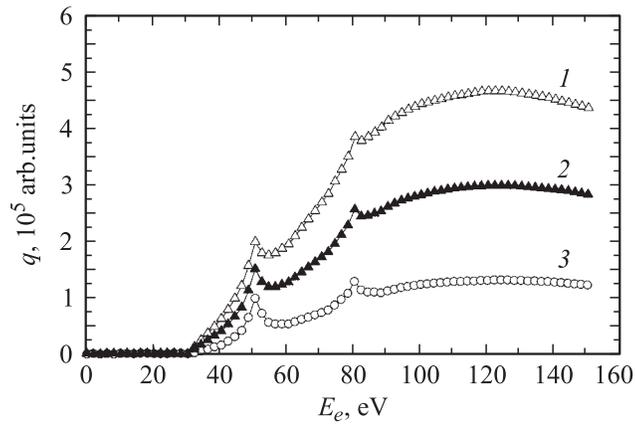


Рис. 5. Выход атомов Cs при ЭСД из монослоя цезия, адсорбированного на пленке германия монослойной толщины, напыленной на вольфрам, в зависимости от энергии бомбардирующих электронов для трех температур подложки: 1 — 300, 2 — 240 и 3 — 160 К.

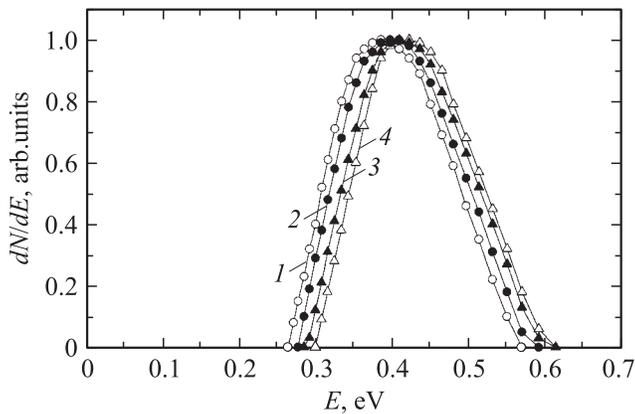


Рис. 6. Нормированные энергораспределения атомов Cs при ЭСД для различных степеней покрытия цезием монослойной пленки германия, напыленной на вольфрам: 1 — 0.25, 2 — 0.50, 3 — 0.75, 4 — 1.0. Температура подложки $T = 300$ К. Энергия электронов $E_e = 50$ eV.

Величины энергий электронов для резонансных пиков хорошо коррелируют с энергиями ионизации остовных уровней вольфрама $5p$ и $5s$ [15].

На рис. 4 изображены графики зависимостей выхода q атомов Cs при ЭСД для четырех энергий электронов от степени покрытия цезием Θ тонкой пленки германия, напыленной на вольфрамовую ленту при $T = 300$ К. Выход растет приблизительно линейно с ростом Θ до ~ 0.9 в пределах погрешности измерений, а затем проходит через пологий максимум. Наклон графиков к оси абсцисс возрастает с ростом энергии электронов и практически не зависит от толщины германиевой пленки.

На рис. 5 показаны графики зависимостей выхода q атомов Cs с поверхности вольфрама, покрытого монослойной пленкой германия, после адсорбции монослоя цезия для температур ниже комнатной в зависимости от энергии бомбардирующих электроны. Видно, что с

уменьшением температуры уменьшается интенсивность выхода во всем диапазоне энергий электронов, однако порог появления выхода и положение резонансных пиков на энергетической шкале сохраняется, причем интенсивность резонансных пиков практически не зависит от температуры подложки.

Рис. 6 иллюстрирует энергораспределения (ЭР) атомов Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого монослойной пленкой германия, для различных степеней покрытия поверхности цезием при энергиях электронов 50 eV. ЭР имеют вид колоколообразных кривых со средней энергией около 0.4 eV, слегка затянутых в область более высоких энергий. С ростом покрытия цезия ЭР смещаются в область более высоких энергий без изменения формы. Этот сдвиг весьма мал и не превышает 0.04 eV в диапазоне покрытий цезия от 0.25 до 1. Для толстой пленки германия при изменении покрытия цезия от 0.25 до 1 ЭР смещаются в область меньших энергий на

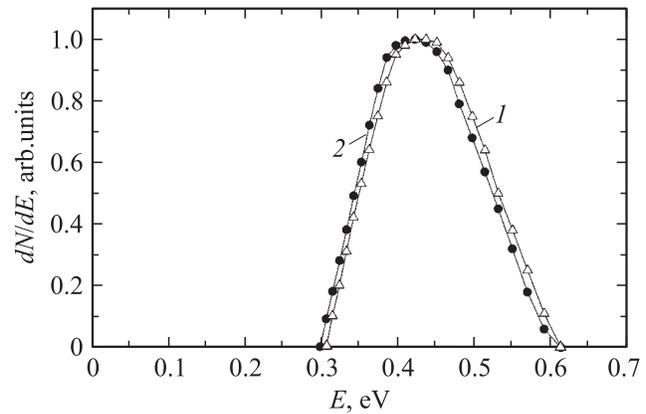


Рис. 7. Нормированные энергораспределения атомов Cs при ЭСД из пленки цезия, адсорбированной на толстой пленке германия, напыленной на вольфрам, для степеней покрытия цезием: 1 — 0.25, 2 — 1.0. Температура подложки $T = 300$ К. Энергия электронов $E_e = 120$ eV.

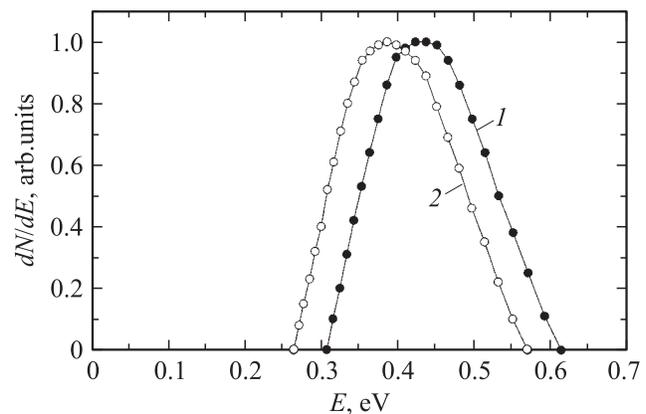


Рис. 8. Нормированные энергораспределения атомов Cs при ЭСД для покрытия цезием 0.25 толстой (кривая 1) и тонкой (кривая 2) пленки германия, напыленной на вольфрам. Температура подложки $T = 300$ К. Энергия электронов $E_e = 120$ eV.

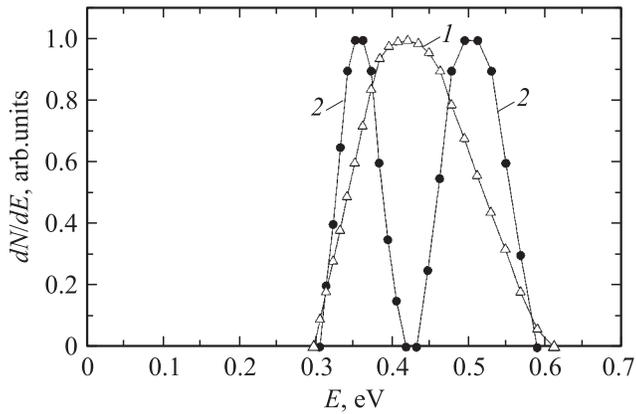


Рис. 9. Нормированные энергораспределения атомов Cs при ЭСД из монослоя цезия, адсорбированного на тонкой пленке германия, напыленной на вольфрам, для температур подложки: 1 — 300 и 2 — 160 К. Энергия электронов $E_e = 50$ eV.

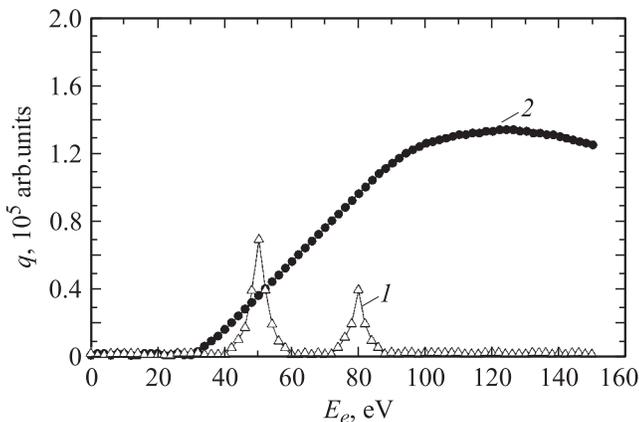


Рис. 10. Выход атомов Cs при ЭСД из монослоя цезия, адсорбированного на тонкой пленке германия, напыленной на вольфрам, в зависимости от энергии бомбардирующих электронов для энергий атомов Cs: 1 — 0.3–0.42 eV, 2 — 0.43–0.59 eV. Температура подложки $T = 160$ К.

~ 0.01 eV (рис. 7). При покрытии цезия $\Theta = 1$ форма и положение ЭР не зависят от толщины пленки германия, однако для покрытия цезия $\Theta = 0.25$ с увеличением толщины пленки германия ЭР сдвигаются к большим энергиям на ~ 0.05 eV (рис. 8).

На рис. 9 приведены ЭР атомов Cs при ЭСД для степени покрытия цезия $\Theta = 1$ на тонкой пленке германия, нанесенной на вольфрам, для двух температур подложки $T = 160$ и 300 К. Колоколообразное ЭР, слегка затянутое к большим энергиям при $T = 300$ К, расщепляется при $T = 160$ К на два отдельных пика, в значительной мере симметричных: один узкий с максимумом при ~ 0.35 eV и второй более широкий с максимумом при ~ 0.5 eV. Зависимости площадей низкоэнергетического и высокоэнергетического пиков от энергии бомбардирующих электронов принципиально отличаются (рис. 10). Зависимость для высокоэнергети-

ческого пика имеет порог при ~ 30 eV и проходит через пологий максимум при ~ 120 eV, а зависимость для низкоэнергетического пика имеет резонансный характер с пиками при ~ 50 и ~ 80 eV.

3. Обсуждение результатов

Адсорбция цезия на поверхности германия сопровождается понижением работы выхода поверхности, причем адатомы Cs распределяются равномерно по поверхности при $T = 300$ К [16,17]. При низких покрытиях цезий адсорбируется в ионной форме, а при покрытиях $\Theta > 0.5$ диполь-дипольное отталкивание приводит к ослаблению связи адсорбированных частиц с германием и металлизации адсорбированной пленки. Реконструкция поверхности германия при адсорбции цезия не обнаружена хотя в пределах монослойного покрытия в термодесорбционных спектрах наблюдается целый ряд пиков, указывающих на заполнение различных адсорбционных мест [17].

ЭСД атомов Cs, адсорбированных на поверхности пленки германия, напыленной на вольфрамовую ленту, может быть рассмотрена на основе модели Оже-стимулированной десорбции, которая была разработана для объяснения ЭСД атомов и ионов щелочных металлов из слоев, адсорбированных на поверхностях окисленного вольфрама и молибдена [5–13]. Согласно этой модели, основным каналом ЭСД атомов и ионов щелочных металлов является образование дырки на основном уровне кислорода $2s$ с энергией ионизации около 25 eV, которая определяет порог появления атомов и ионов щелочных металлов. Эта дырка может заполняться электроном с уровня кислорода $2p$, вызывая Оже-процесс. Оже-электрон может либо покинуть адсорбционную систему, либо быть захваченным адсорбированным ионом щелочного металла. В результате Оже-процесса отрицательный ион кислорода становится положительным и, если Оже-электрон уходит из адсорбционной системы, начинает отталкивать положительный ион щелочного металла, что и приводит к ЭСД положительных ионов щелочных металлов. Если Оже-электрон нейтрализует положительный ион щелочного металла, а положительный ион кислорода восстанавливает отрицательный заряд быстрее, чем реионизуется атом щелочного металла, будет наблюдаться ЭСД атомов щелочных металлов в результате перекрытия валентных орбиталей атома щелочного металла и отрицательного иона кислорода. Чем больше перекрытие, тем больше кинетическая энергия десорбирующихся атомов. С увеличением покрытия щелочного металла равновесное расстояние адсорбированных частиц от подложки увеличивается вследствие отталкивательных латеральных взаимодействий между частицами и соответственно уменьшается кинетическая энергия десорбирующихся атомов.

Германий достаточно хорошо изолирует адсорбированный слой цезия от вольфрама, так как выход атомов Cs только в несколько раз ниже, чем при ЭСД

атомов Cs из слоя цезия, адсорбированного на окисленном вольфраме [9]. Порог появления выхода атомов Cs составляет ~ 30 eV, что хорошо согласуется с энергией ионизации уровня германия $3d$ и позволяет предположить, что в данном случае действует механизм ЭСД, аналогичный описанному выше для ЭСД атомов щелочных металлов из слоев щелочных металлов, адсорбированных на поверхностях окисленного вольфрама и молибдена. Оже-электрон с энергией < 30 eV эффективно нейтрализует адсорбированный ион Cs^+ , а образовавшийся положительный ион германия быстро восстанавливает свой первоначальный заряд за счет электронов подложки, причем только два монослоя осажденного германия практически полностью экранируют от вольфрама слой германия, находящийся в контакте с цезием, вызывая насыщение выхода атомов Cs при времени напыления германия $t > 800$ s (рис. 1). Наличие максимума в выходе атомов Cs от времени напыления германия на рис. 1 свидетельствует, что время жизни положительного заряда ионов германия в монослое германия на вольфраме меньше, чем на германиевой пленке [9], а линейная зависимость выхода атомов Cs от степени покрытия цезием тонкой пленки германия на вольфраме указывает, что время жизни положительного иона германия на вольфраме не зависит от количества адсорбированного цезия (рис. 4). Линейная зависимость выхода атомов Cs от времени напыления пленки германия на вольфраме после установления постоянного потока атомов германия ($300 < t < 400$ s, рис. 1) подтверждает предположение о равномерном распределении цезия в монослое при $T = 300$ K по поверхности [16].

Величина энергии Оже-электрона, вызывающего нейтрализацию адсорбированных ионов щелочного металла, имеет важное значение для реализации данного механизма ЭСД. Действительно, выход атомов Cs из слоя цезия, адсорбированного на окисленном вольфраме, инициируемый Оже-электронами с энергией ~ 25 eV, выше, чем выход атомов Cs из слоя цезия, адсорбированного на вольфраме, покрытом пленкой германия, который инициируется Оже-электронами с энергией ~ 30 eV, а для вольфрама, покрытого пленкой кремния, при энергии Оже-электронов ~ 90 eV выход атомов Cs не обнаружен [13], так как эффективность нейтрализации адсорбированного иона Оже-электроном больше для более медленных электронов.

Для толстой пленки германия ЭР атомов Cs с ростом покрытия цезия смещаются к меньшим энергиям (рис. 7) так же, как при ЭСД атомов щелочных металлов с окисленного вольфрама, где этот эффект объясняется увеличением расстояния атома цезия от подложки с ростом Θ . Предполагаем, что и здесь, на толстой пленке германия, атомы цезия удаляются от подложки с ростом Θ за счет латеральных взаимодействий. С другой стороны, для тонких пленок германия ЭР атомов Cs при ЭСД с ростом Θ смещаются в область больших энергий (рис. 6), что, по-видимому, вызвано влиянием

вольфрама. Действительно, ионы Cs^+ , адсорбированные на германиевой пленке, с ростом Θ должны сдвигать германиевую пленку за счет сил изображения в направлении вольфрама, а уменьшение эффективного заряда ионов Cs^+ с ростом Θ может компенсировать рост сил изображения. Следовательно, сдвиг ЭР атомов Cs в ту или иную сторону является результатом конкуренции этих двух процессов. Отличие от случая кислородной пленки на вольфраме заключается в том, что заряд германиевой пленки на вольфраме, покрытой пленкой цезия, близок к нулю, а заряд кислородной пленки имеет значительную отрицательную величину, что, по-видимому, и является причиной смещения ЭР атомов Cs в противоположных направлениях. Для $\Theta = 1$ положение ЭР атомов Cs не зависит от толщины германиевой пленки, что может быть следствием нейтрализации цезиевого адсорбированного слоя [18–21]. Наконец, смещение ЭР атомов Cs для $\Theta = 0.25$ при ЭСД с толстой пленки германия к большим энергиям по сравнению с тонкой германиевой пленкой (рис. 8) может быть вызвано тем, что атом Cs на толстой пленке германия отталкивается от нейтрального атома Ge, а для тонкой пленки германия атом Cs отталкивается от положительного иона Ge^+ , размер которого меньше.

Резонансные пики выхода атомов Cs при энергиях электронов 50 и 80 eV можно связать с резонансной ионизацией уровней вольфрама $5p$ и $5s$. Этот канал ЭСД, по-видимому, вызван образованием соответствующих остовных экситонов вольфрама. Подобные резонансные пики были нами обнаружены ранее при ЭСД Li и Na из слоев лития и натрия, адсорбированных на окисленном молибдене [11,22], и при ЭСД нейтральных частиц из слоев самария, адсорбированных на окисленном вольфраме [23]. В последнем случае пики были приписаны ЭСД молекул SmO на основании детального исследования температурной зависимости тока поверхностной ионизации в поверхностно-ионизационном детекторе [24]. Для ЭСД нейтральных частиц из слоев лития и натрия, адсорбированных на окисленном молибдене, обнаружена отчетливая корреляция между появлением резонансных пиков и низкоэнергетическими „хвостами“ в ЭР. Эти особенности были интерпретированы как результат десорбции молекул LiO и NaO. При ЭСД нейтральных частиц из слоя цезия, адсорбированного на германии, никаких хвостов в энергораспределениях не обнаружено. Поэтому можно предположить, что соединения цезия с германием неустойчивы и быстро диссоциируют вблизи поверхности. Это предположение подтверждается тем фактом, что расщепление ЭР на два пика наблюдается только при $T < 300$ K (рис. 9). Зависимости вклада низкоэнергетического и высокоэнергетического пиков от энергии электронов (рис. 10) позволяют считать, что низкоэнергетический пик в ЭР связан с возбуждением уровней вольфрама $5p$ и $5s$, а высокоэнергетический пик — с возбуждением уровня германия $3d$. Увеличение толщины германиевой пленки свыше двух монослоев полностью экранирует возбуждение вольфрама от адсорбированного слоя цезия.

Таким образом, в настоящей работе впервые обнаружена ЭСД атомов Cs из слоя цезия, адсорбированного на поверхности германиевой пленки, нанесенной на вольфрам. Выход атомов Cs связан с возбуждением уровня $3d$ германия, а также с возбуждением уровней $5s$ и $5p$ вольфрама, носящим резонансный характер, что приписывается образованию остоного экситона вольфрама. Изменение положения энергораспределений атомов Cs позволяет судить об изменении взаимодействия слоя цезия с вольфрамом при изменении толщины пленки германия.

Список литературы

- [1] R.D. Ramsier, J.T. Yates. Surf. Sci. Rep. **12**, 247 (1991).
- [2] V.N. Ageev. Progr. Surf. Sci. **47**, 55 (1994).
- [3] Physics and chemistry of alkali metal adsorption / Eds H.P. Bonzel, A.M. Bradshaw, G. Ertl. Elsevier, Amsterdam (1989). 486 p.
- [4] Э.Я. Зандберг, Н.И. Ионов. Поверхностная ионизация. Наука, М. (1969). 432 с.
- [5] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Б.В. Якшинский. ФТТ **24**, 2, 349 (1982).
- [6] В.Н. Агеев, О.П. Бурмистрова, Ю.А. Кузнецов. ФТТ **29**, 6, 1740 (1987).
- [7] V.N. Ageev, O.P. Burmistrova, B.V. Yakshinskii. Surf. Sci. **194**, 101 (1988).
- [8] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Н.Д. Потехина. ФТТ **33**, 6, 1834 (1991); **35**, 1, 156 (1993).
- [9] V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, N.D. Potekhina. Surf. Sci. **367**, 113 (1996).
- [10] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Н.Д. Потехина. ФТТ **39**, 8, 1491 (1997); В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов. ФТТ **39**, 4, 758 (1997).
- [11] V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, T.E. Madey. Surf. Sci. **390**, 146 (1997); Phys. Rev. B **58**, 2248 (1998).
- [12] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов. ФТТ **42**, 4, 759 (2000).
- [13] V.N. Ageev, O.P. Burmistrova, B.V. Yakshinskii. Surf. Sci. **230**, 295 (1990).
- [14] Э.Ф. Чайковский, Г.М. Пятигорский, Д.Ф. Деркач. Изв. АН СССР. Сер. физ. **38**, 2, 376 (1974).
- [15] Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Под ред. Д. Бриггса, М.П. Сиха. Мир, М. (1987). С. 567.
- [16] R.E. Weber, W.T. Peria. Surf. Sci. **14**, 13 (1969).
- [17] L. Surnev, M. Tichov. Surf. Sci. **85**, 413 (1979).
- [18] В.Н. Агеев, О.П. Бурмистрова, Ю.А. Кузнецов. Поверхность **7**, 28 (1988).
- [19] E. Wimmer, A.J. Freeman, J.R. Hiskes, A.M. Karo. Phys. Rev. B **28**, 3074 (1983).
- [20] H. Ishida, K. Terakura. Phys. Rev. B **40**, 11 519 (1989).
- [21] G.K. Wertheim, D.M. Riffe, P.H. Citrin. Phys. Rev. B **49**, 4834 (1994).
- [22] V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, T.E. Madey. Surf. Sci. **451**, 153 (2000).
- [23] V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, T.E. Madey. Surf. Sci. **528**, 47 (2003).
- [24] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов. Письма в ЖТФ **29**, 24, 1 (2003).