

Электронно-стимулированная десорбция атомов цезия из слоев цезия, адсорбированных на вольфраме, покрытом пленкой золота

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

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

E-mail: kuznetsov@ms.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 10 октября 2008 г.)

Измерены выход и энергораспределения (ЭР) атомов цезия при электронно-стимулированной десорбции (ЭСД) из слоев цезия, адсорбированных на вольфраме, покрытом пленкой золота, в зависимости от энергии бомбардирующих электронов, толщины пленки золота, количества адсорбированного цезия и температуры поверхности. Измерения выполнены времяпролетным методом с помощью детектора на основе поверхностной ионизации. Выход ЭСД атомов Cs наблюдается лишь после нанесения на поверхность вольфрама более одного монослоя золота и более одного монослоя цезия при $T = 300$ К, что сопровождается образованием пленки полупроводникового соединения Cs_xAu_y с субмонослоем атомов Cs. Зависимость выхода ЭСД от энергии электронов имеет резонансный характер и состоит из двух пиков с порогом появления 57 eV при $T = 300$ К и 24 eV при 160 К, связанных с возбуждением уровней Au $5p_{3/2}$ в подложке и $5s$ Cs в адслое цезия. Возбуждение уровня Au $5p_{3/2}$ дает в ЭР атомов Cs при $T = 300$ К один широкий пик с максимумом при $E \sim 0.45$ eV, который при $T = 160$ К расщепляется на два пика с максимумами при $E \sim 0.36$ и ~ 0.45 eV, связанные с различными каналами ЭСД атомов Cs. Возбуждение уровня Cs $5s$ при $T = 160$ К в адслое дает в ЭР атомов Cs пик с максимумом при $E \sim 0.57$ eV, который существует лишь при $T < 240$ К и малых концентрациях цезия. Предложены механизмы для всех каналов ЭСД атомов Cs, которые сравниваются с каналами ЭСД атомов Na в системе Na–Au–W.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-02-00284).

PACS: 68.43.Rs, 68.47.De, 79.20.La

1. Введение

Щелочные металлы широко используются в качестве покрытий для понижения работы выхода электронных эмиттеров, а также промоторов ассоциативных каталитических реакций [1]. Золото служит селективным катализатором в реакциях ряда углеродных соединений [2,3].

Адсорбция цезия на золоте приводит к образованию широкозонного полупроводника с шириной запрещенной зоны ~ 2.6 eV и структурой типа CsCl [4], а недавно вызвала интерес в области исследований неадиабатических молекулярно-поверхностных переходов энергии в связи с наблюдением колебательно-стимулированной электронной эмиссии (vibrationally promoted electron emission) [5].

Обычно выход электронно-стимулированной десорбции (ЭСД) из металлопленочных систем пренебрежимо мал из-за малого времени жизни возбужденных состояний в таких системах [6]. Однако при облучении электронами пленки натрия, адсорбированной на вольфраме, покрытом пленкой золота, обнаружена десорбция атомов Na, что, по-видимому, связано с образованием полупроводниковой пленки Na_xAu_y [7,8], увеличивающей время жизни возбужденных состояний, ответственных за ЭСД атомов Na. Это предположение разумно было проверить путем изучения ЭСД атомов Cs из слоев цезия, адсорбированных на золоте. Поэтому целью настоящей работы было измерить выход

и энергораспределения (ЭР) атомов Cs при ЭСД из слоев цезия, адсорбированных на вольфраме, покрытом пленкой золота, в зависимости от концентрации адсорбированного цезия, толщины пленки золота, энергии бомбардирующих электронов и температуры подложки.

2. Экспериментальная техника

Экспериментальный прибор и методика измерений детально описаны ранее [9]. Отметим лишь некоторые изменения, связанные со спецификой настоящей работы. Измерения выполнялись времяпролетным методом при импульсном облучении мишени электронами. Длительность импульсов составляла $1 \mu s$, а частота 1 kHz. Стационарная плотность тока бомбардирующих электронов не превышала $5 \cdot 10^{-6}$ A/cm² при ускоряющем напряжении ~ 200 eV и не вызывала заметного нагрева мишени. Поток десорбирующихся положительных ионов задерживался потенциалом, приложенным между мишенью и сеточным электродом в пространстве дрейфа, а нейтральные частицы ионизовались в детекторе на основе поверхностной ионизации, и ионный ток регистрировался с помощью вторично-электронного умножителя. В качестве мишени использовались текстурированная вольфрамовая лента размерами $70 \times 2 \times 0.01$ mm с преимущественным выходом на поверхность грани (100). Текстурирование ленты производилось путем ее нагрева до $T = 2000$ К переменным током в течение 5 h.

Очистка ленты от углерода выполнялась по стандартной процедуре путем ее прокаливания при $T = 1800$ К и давлении кислорода $p(\text{O}_2) = 1 \cdot 10^{-6}$ Торг в течение 3 h. Затем кислород откачивался, а адсорбированный кислород удалялся при $T = 2200$ К в течение 3 min.

Золото напылялось на ленту при $T = 300$ К из прямо-накальной вольфрамовой трубки, в которую помещались кусочки Au чистотой 99.99%. По длине трубки имелось несколько отверстий для равномерного напыления золота вдоль ленты. Концентрация напыленного золота определялась по времени напыления и контролировалась по выходу ионов Na^+ при поверхностной ионизации после адсорбции кислорода на поверхность Au–W для установления отсутствия участков, свободных от золота.

Цезий осаждался на ленту при $T = 300$ К постоянным потоком из прямонакального испарителя путем термического разложения хромата цезия. Концентрация цезия на поверхности ленты определялась по времени напыления постоянным потоком, интенсивность которого измерялась по току поверхностной ионизации цезия на ленте [10]. Давление остаточных газов в приборе не превышало $5 \cdot 10^{-10}$ Торг.

Лента могла охлаждаться в диапазоне температур 160–300 К путем изменения скорости пропускания через полые тоководы газообразного азота, который предварительно охлаждался в медной трубке, погруженной в жидкий азот. Температура ленты в этом диапазоне температур определялась из температурной зависимости электрического сопротивления. Нагрев ленты осуществлялся электрическим током, а 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.

3. Результаты

Бомбардировка электронами слоя цезия, адсорбированного на вольфраме, покрытом пленкой золота, может приводить к десорбции атомов Cs. На рис. 1 приведен график зависимости выхода атомов Cs при энергии бомбардирующих электронов 64 eV от концентрации адсорбированного цезия на поверхности вольфрама, покрытого пленкой золота толщиной два монослоя, при $T = 300$ К. Выход атомов Cs появляется при концентрации цезия $n_{\text{Cs}} = 5 \cdot 10^{14}$ at/cm², соответствующей монослою цезия, линейно возрастает с ростом концентрации цезия, достигая насыщения после заполнения второго монослоя цезия. По-видимому, первый монослой цезия соответствует формированию пленки цезия с металлическими свойствами, время жизни возбужденных состояний в котором слишком мало для ЭСД. После завершения формирования монослоя цезия начинает расти пленка полупроводникового соединения Cs_xAu_y , время

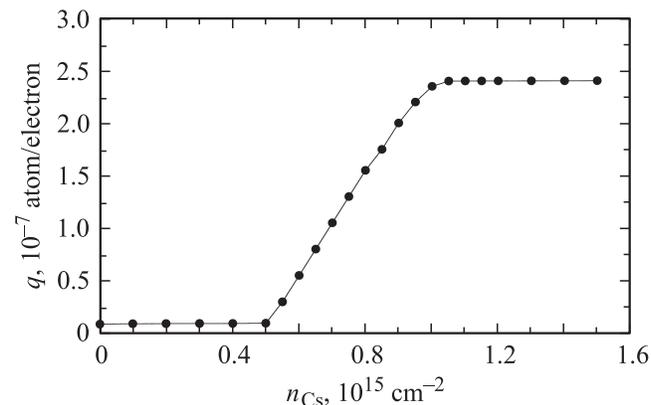


Рис. 1. Выход q атомов Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого двумя монослоями золота, при $T = 300$ К в зависимости от концентрации адсорбированного цезия n_{Cs} для энергии бомбардирующих электронов 64 eV.

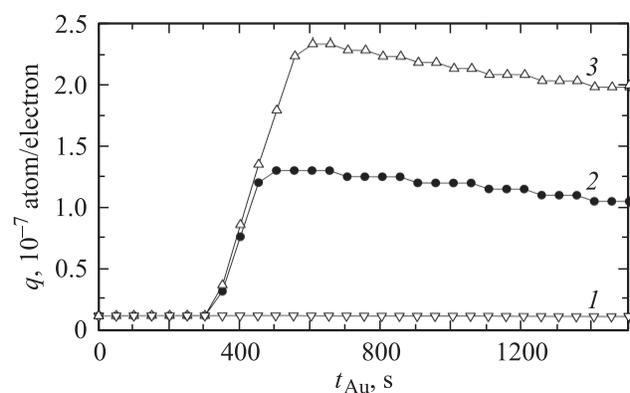


Рис. 2. Выход q атомов Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого пленкой золота, в зависимости от времени напыления золота t_{Au} для различных концентраций адсорбированного цезия n_{Cs} при $T = 300$ К и энергии электронов 64 eV. $n_{\text{Cs}}, 10^{15} \text{ at/cm}^2$: 1 — 0.5, 2 — 0.75, 3 — 1.0.

жизни возбужденных состояний в которой значительно больше.

Аналогичная зависимость выхода ЭСД атомов Na [7] с ростом концентрации натрия проходит через максимум вблизи концентрации натрия в два монослоя вследствие роста концентрации в верхнем слое больше монослоя и соответственно экранировки слоя натрия от бомбардирующих электронов. Выход атомов Cs с ростом концентрации цезия только достигает насыщения, но не проходит через максимум, так как в отличие от натрия цезий не адсорбируется при $T = 300$ К сверх монослоя [11].

Указанные особенности формирования монослоя цезия на пленке сплава CsAu на поверхности вольфрама подтверждаются рис. 2, на котором представлены зависимости выхода атомов Cs от времени напыления золота для различных концентраций адсорбированного цезия при $T = 300$ К и энергии электронов 64 eV. Время появления выхода атомов Cs ($t_{\text{Au}} = 300$ s) соответствует

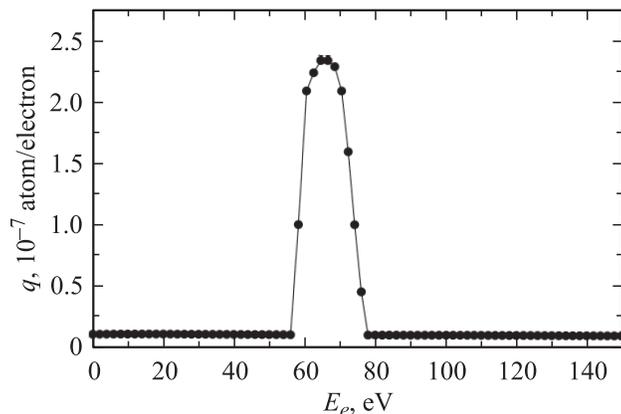


Рис. 3. Выход q атомов Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого двумя монослоями золота, при $T = 300$ К в зависимости от энергии бомбардирующих электронов E_e для концентрации адсорбированного цезия $1.0 \cdot 10^{15}$ ат/см².

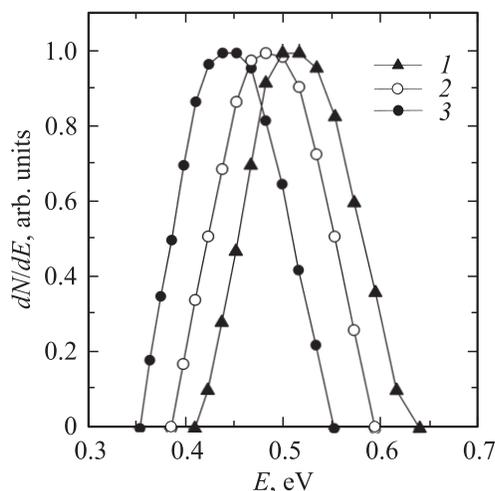


Рис. 4. Нормированные энергораспределения атомов Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого двумя монослоями золота, при $T = 300$ К для различных концентраций цезия. n_{Cs} , 10^{15} ат/см²: 1 — 0.6, 2 — 0.75, 3 — 1.0. Энергия бомбардирующих электронов 64 эВ.

заполнению монослоя золота, на котором адсорбировано более монослоя цезия. С увеличением времени напыления золота выход атомов Cs растет линейно и после напыления двух монослоев золота достигает максимума ($t_{Au} = 600$ с). Каждый раз цезий напылялся заново после напыления соответствующей пленки золота, так как только в этом случае наблюдался воспроизводимый выход атомов Cs. При дальнейшем напылении золота наблюдается незначительный спад выхода атомов Cs, который может быть вызван уменьшением концентрации цезия в верхнем слое вследствие диффузии цезия в пленку золота.

Зависимость выхода атомов Cs от энергии бомбардирующих электронов (рис. 3) имеет резонансный характер с максимумом при энергии электронов ~ 64 эВ,

который близок к энергии остоной оболочки Au 5p (57–75 эВ) [12]. Пик выхода атомов Cs имеет слегка асимметричный характер, расширенный в область высоких энергий. Этот график резко отличается от аналогичного графика зависимости выхода $q(E_e)$ атомов Na, в котором имеются два максимума при энергиях электронов 64 и 82 эВ, близких к энергиям остоных уровней Au 5p_{3/2} (57 эВ) и Au 5p_{1/2} (75 эВ) [12].

На рис. 4 изображены графики ЭР атомов Cs для трех концентраций цезия, адсорбированного при $T = 300$ К на вольфрамовую подложку, покрытую двумя монослоями золота при энергии электронов 64 эВ. ЭР при $T = 300$ К имеют вид колоколообразных кривых с максимумом при энергии атомов Cs около 0.5 эВ для $n_{Cs} = 0.6 \cdot 10^{15}$ ат/см², который с ростом концентрации цезия смещается без изменения формы в область низких энергий. ЭР атомов Cs кардинально отличаются от ЭР атомов Na, которые при $T = 300$ К состоят из двух пиков: широкого с максимумом при ~ 0.35 эВ и узкого с максимумом при ~ 0.15 эВ [7].

На рис. 5 представлены графики ЭР атомов Cs для трех концентраций золота, осажденного при $T = 300$ К на вольфрамовую подложку и затем покрытую пленкой цезия с концентрацией $1.0 \cdot 10^{15}$ ат/см² при энергии бомбардирующих электронов 64 эВ. ЭР имеют вид колоколообразных кривых с максимумом при ~ 0.45 эВ. Фронт ЭР с ростом концентрации золота смещается в область низких энергий, а спадающий участок ЭР не зависит от концентрации золота.

Рис. 6 отображает трансформацию ЭР атомов Cs при уменьшении с 300 до 160 К температуры измерения ЭСД атомов Cs с поверхности вольфрама, покрытого при 300 К двумя монослоями золота и двумя монослоями цезия: ЭР с одним пиком при $T = 300$ К превращаются при $T = 160$ К в ЭР с двумя пиками, один из которых

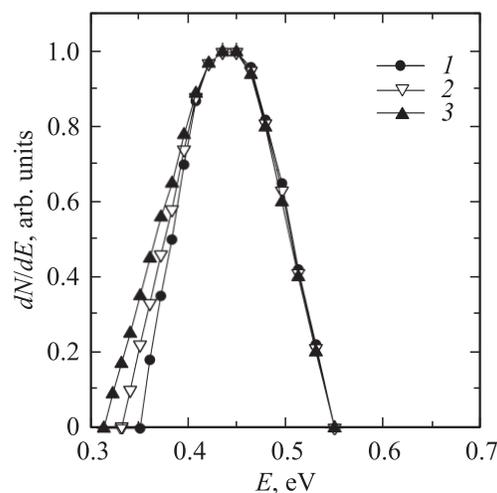


Рис. 5. Нормированные энергораспределения атомов Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого пленками золота в течение различного времени напыления t_{Au} и затем цезием с концентрацией $1.0 \cdot 10^{15}$ ат/см², при $T = 300$ К. t_{Au} , с: 1 — 600, 2 — 900, 3 — 1200. Энергия бомбардирующих электронов 64 эВ.

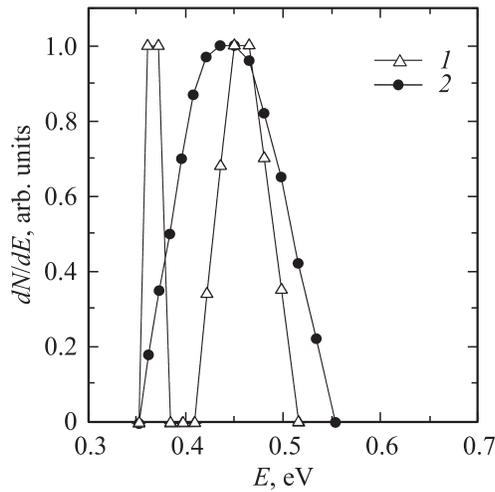


Рис. 6. Нормированные энергораспределения атомов Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого при температуре 300 К двумя монослоями золота и двумя монослоями цезия, для температур подложки 160 (1) и 300 К (2). Энергия бомбардирующих электронов 64 эВ.

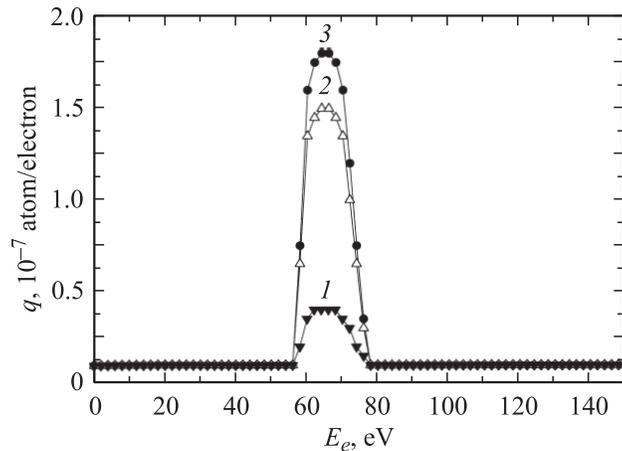


Рис. 7. Выход q атомов Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого при температуре 300 К двумя монослоями золота и двумя монослоями цезия, при $T = 160$ К в зависимости от энергии бомбардирующих электронов E_e для НЭ- (1) и ВЭ- (2) пиков энергораспределения. 3 — полный выход.

широкий, высокоэнергетический (ВЭ), имеет максимум при 0.46 эВ, а второй узкий, низкоэнергетический (НЭ), имеет максимум при 0.36 эВ.

На рис. 7 представлены интенсивности выхода $q(E_e)$ для ВЭ- и НЭ-пиков ЭР при 160 К после адсорбции на вольфрамовую подложку при 300 К двух монослоев золота и двух монослоев цезия. Интенсивность широкого ВЭ-пика примерно в 5 раз больше интенсивности узкого НЭ-пика.

На рис. 8 приведены ЭР атомов Cs при энергии электронов 64 эВ и температуре подложки 160 К для двух концентраций цезия, адсорбированного при 300 К на вольфрам, покрытый двумя монослоями золота. С рос-

том концентрации цезия узкий НЭ-пик сохраняет свое положение по энергии, а широкий ВЭ-пик смещается в область низких энергий с сохранением формы.

На рис. 9 показаны ЭР атомов Cs при энергии электронов 64 эВ и температуре подложки 160 К для концентрации цезия $1.0 \cdot 10^{15}$ ат/см², адсорбированного при 300 К на вольфрам, покрытый различными концентрациями золота. С ростом концентрации золота в противоположность тому, что наблюдается на рис. 8, положение широкого ВЭ-пика сохраняется по энергии, а узкий НЭ-пик смещается в область низких энергий. Из рис. 10 видно, что в этих условиях интенсивность

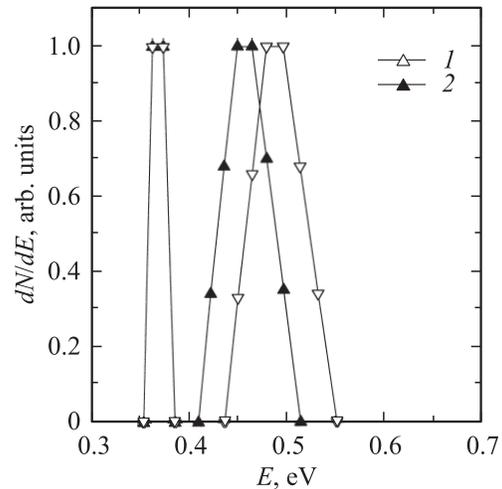


Рис. 8. Нормированные энергораспределения атомов Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого при температуре 300 К двумя монослоями золота, при $T = 160$ К для двух концентраций цезия, адсорбированного при 300 К. n_{Cs} , 10^{15} ат/см²: 1 — 0.75, 2 — 1.0. Энергия бомбардирующих электронов 64 эВ.

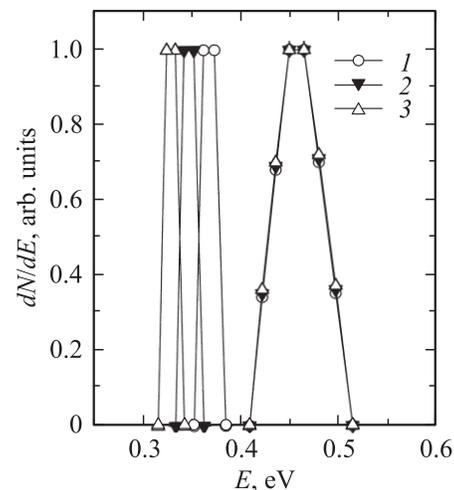


Рис. 9. Нормированные энергораспределения атомов Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого при температуре 300 К пленками золота в течение различного времени напыления t_{Au} и затем цезием с концентрацией $1.0 \cdot 10^{15}$ ат/см², при $T = 160$ К. t_{Au} , с: 1 — 600, 2 — 900, 3 — 1200. Энергия бомбардирующих электронов 64 эВ.

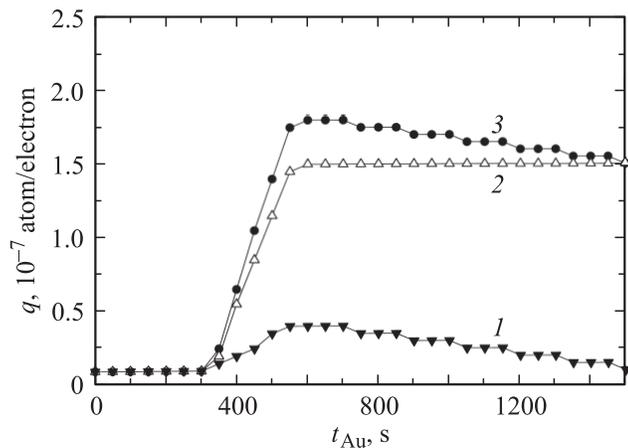


Рис. 10. Выход q атомов Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого при температуре 300 К пленкой золота и цезием с концентрацией $1.0 \cdot 10^{15}$ at/cm², при $T = 160$ К в зависимости от времени напыления золота t_{Au} для НЭ- (1) и ВЭ- (2) пиков энергораспределения. 3 — полный выход.

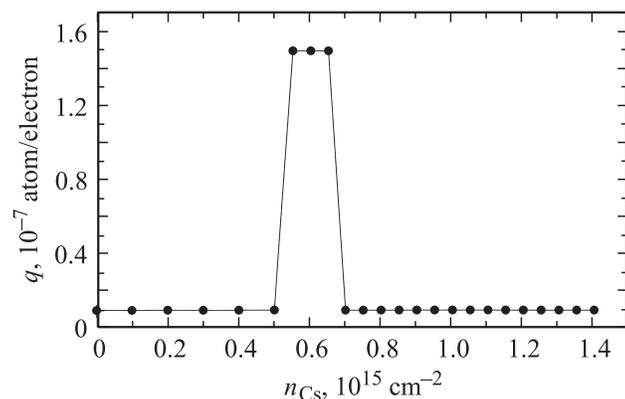


Рис. 11. Выход q атомов Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого при температуре 300 К двумя монослоями золота, при $T = 160$ К в зависимости от концентрации адсорбированного цезия n_{Cs} для энергии бомбардирующих электронов 38 eV.

широкого ВЭ-пика не зависит от толщины пленки золота, а интенсивность узкого НЭ-пика постепенно спадает с ростом толщины пленки золота.

На рис. 11 приведен выход атомов Cs при температуре подложки 160 К в зависимости от концентрации цезия, адсорбированного при 300 К на вольфраме, покрытом двумя монослоями золота, при энергии электронов 38 eV. Выход появляется после адсорбции монослоя цезия, достигает максимума при концентрации цезия $\sim 0.6 \cdot 10^{15}$ at/cm², а затем уменьшается до нуля при концентрации цезия $\sim 0.7 \cdot 10^{15}$ at/cm².

На рис. 12 сравниваются зависимости выхода атомов Na и Cs от энергии электронов при $T = 160$ К и покрытиях натрия и цезия, близких к монослою. В обоих случаях выход ЭСД резонансно зависит от энергии электронов. Для натрия выход ЭСД атомов Na появляется при $E_e = 30$ eV, достигает первого максиму-

ма при $E_e = 40$ eV, спадает до нуля при $E_e = 54$ eV, а затем проходит еще через два максимума при энергиях электронов 65 и 81 eV [8]. Для ЭСД атомов Cs порог выхода в первом максимуме по сравнению с натрием сдвинут в сторону меньших энергий на 6 eV, порог же для второго максимума тот же, что и для натрия, а третий максимум неразрешим и сливается со вторым. Его присутствие проявляется в большей ширине (~ 20 eV) второго максимума по сравнению с натрием.

На рис. 13 дано сравнение температурных зависимостей выхода атомов Na и Cs при покрытиях, близких к монослою натрия и цезия на подложке из двух монослоев золота на вольфраме, для $E_e \leq 44$ eV. Выход не зависит от температуры для натрия до 200 К, для цезия до 220 К, а затем спадает до нуля в температурном интервале ~ 20 К в обоих случаях.

На рис. 14 показаны ЭР атомов Cs для концентрации цезия $0.65 \cdot 10^{15}$ at/cm², адсорбированного на вольфраме, покрытом двумя монослоями золота, при 160 К

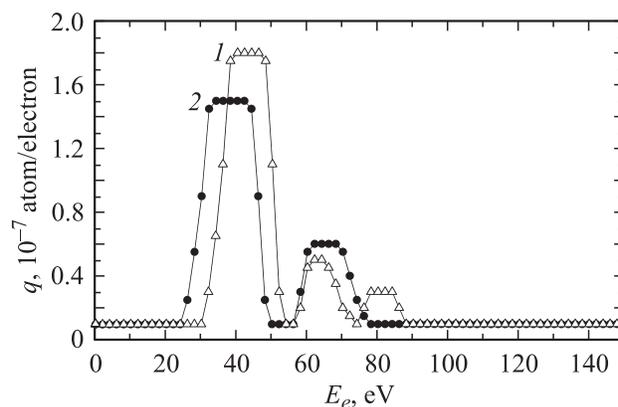


Рис. 12. Выход q атомов Na и Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого при температуре 300 К двумя монослоями золота, при $T = 160$ К в зависимости от энергии бомбардирующих электронов E_e для концентраций натрия $1.0 \cdot 10^{15}$ at/cm² (1) и цезия $0.65 \cdot 10^{15}$ at/cm² (2).

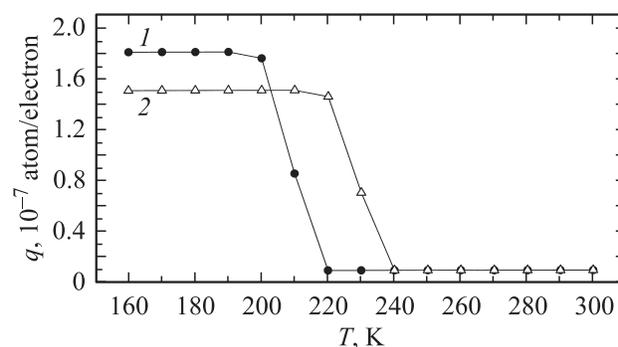


Рис. 13. Выход q атомов Na и Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого при температуре 300 К двумя монослоями золота, в зависимости от температуры подложки для концентраций натрия $1.0 \cdot 10^{15}$ at/cm² (1) и цезия $0.65 \cdot 10^{15}$ at/cm² (2). Энергия бомбардирующих электронов, eV: для натрия — 44, для цезия — 38.

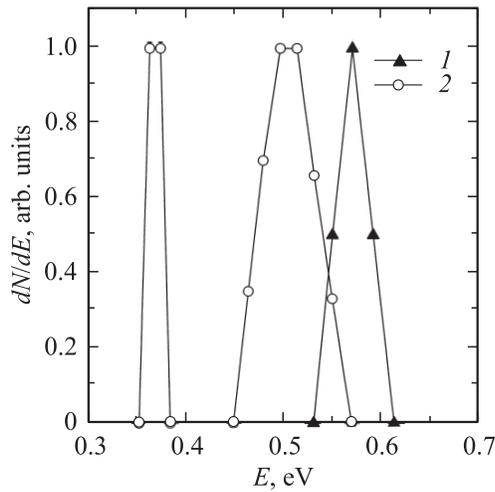


Рис. 14. Нормированные энергораспределения атомов Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого при температуре 300 К двумя монослоями золота и цезием с концентрацией $0.65 \cdot 10^{15} \text{ at/cm}^2$, при $T = 160 \text{ K}$ для энергий бомбардирующих электронов 38 (1) и 64 (2).

и энергиях электронов 38 и 64 eV. В первом случае возбуждаются уровни атомов Cs $5s$, а во втором — уровни Au $5p_{3/2}$, ответственные за образование ВЭ- и НЭ-пиков ЭР. Положение пика ЭР атомов Cs после возбуждения уровня Cs $5s$ в пределах точности измерений соответствует положению пика в ЭР атомов Na после возбуждения уровня Na $2p$ при напылении $1.0 \cdot 10^{15} \text{ at/cm}^2$ натрия на вольфрам, покрытый двумя монослоями золота.

4. Обсуждение результатов

Золото не растворяется в вольфраме, и поэтому граница золото–вольфрам является атомно-резкой, причем пленка золота растет эпитаксиально на грани W(100) в пределах монослоя, а при покрытии больше монослоя образуются разупорядоченные кристаллиты с объемными свойствами [13,14]. Напыление цезия на пленку золота, нанесенную на вольфрам, сопровождается понижением работы выхода [15,16]. При термодесорбции цезия наблюдаются две фазы десорбции, одна из которых с ростом покрытия цезия испытывает насыщение и приписана формированию монослойного покрытия цезия на монослойной пленке золота на вольфраме, а вторая растет неограниченно на многослойной пленке золота поверх W(100) и коррелирует с образованием полупроводникового соединения Cs_xAu_y [17].

Можно предположить, что монослой цезия, адсорбированный на вольфраме, покрытом монослоем золота, обладает металлическими свойствами и как любая металлопленочная подложка имеет слишком короткое время жизни возбужденных состояний для ЭСД. Следующий слой золота реагирует с цезием, образуя

полупроводниковое соединение Cs_xAu_y и обеспечивает выход ЭСД атомов Cs. Цезий в отличие от натрия при комнатной температуре не адсорбируется поверх монослоя цезия, и поэтому выход атомов Cs с ростом концентрации цезия достигает насыщения (рис. 1), в то время как выход ЭСД атомов Na с ростом концентрации натрия проходил через максимум [8] вследствие экранировки золота атомами натрия [11].

Резонансный характер выхода атомов Cs (рис. 3) при энергии электронов 64 eV, по-видимому, связан с возбуждением остовных электронов с уровня $5p_{3/2}$ Au в пики плотности свободных состояний зоны проводимости с образованием остовного экситона. Как показано расчетами, такие пики действительно появляются в зоне проводимости при адсорбции атомов щелочных металлов (ЩМ) на поверхности полупроводника или металла [18–20]. Электронные состояния в окрестности этих пиков выше уровня Ферми образуют гибридную $ns + np_z$ -незанятых орбиталей ЩМ и дают анти-связь с поверхностью. Возбуждение электронов в эти пики состояний могут нейтрализовать адсорбированные ионы ЩМ и вызвать десорбцию атомов ЩМ за счет увеличения радиуса адсорбированного иона при его нейтрализации (Na — от ~ 1 до 2.0 \AA , Cs — от 1.3 до $\sim 1.7 \text{ \AA}$) и перехода системы адион–поверхность в антисвязанное состояние.

Возникающая в результате этого возбуждения остовная дырка Au $5p_{3/2}$ заполняется электроном с лежащего выше уровня. Оже-электроны, испускаемые в результате нейтрализации дырки, могут оказаться в зоне проводимости и захватиться ионами Cs^+ в адслое или в объеме сплава CsAu. Захват электронов адсорбированными ионами приводит к их нейтрализации и десорбции, а захват электрона из зоны проводимости молекулой Cs^+Au в сплаве CsAu переводит ее в антисвязанное состояние, как и присоединение электрона к свободной молекуле CsCl [21]. Связь Cs–Au в молекуле сплава CsAu разрушается, и атом Cs слетает. Этот процесс аналогичен разрушению сплава CsAu при его облучении светом с $h\nu > 2.6 \text{ eV}$ [4,22].

Заметим, что резонансная зависимость выхода ЭСД атомов от энергии электронов может возникнуть лишь при возбуждении остовных электронов подложки или адслоя в сильно локализованные состояния, но не просто при ионизации остовных состояний подложки с образованием свободных электронов, вероятность которой имеет плавную зависимость от энергии электронов и гораздо меньше по величине, чем вероятность возбуждения в локализованные состояния [23–25]. Наличие пиков плотности состояний в зоне проводимости необходимо для появления резонансов в выходе ЭСД.

В работе [7] по изучению ЭСД атомов Na из системы Na–Au–W зависимость выхода атомов Na $q(E_e)$ имела два резонансных пика, связанных с возбуждением в экситонное состояние уровней золота $5p_{3/2}$ и $5p_{1/2}$, энергии которых (57 и 75 eV) близки к порогам появления этих резонансов. Но при адсорбции цезия на вольфраме,

покрытом пленкой золота, выход ЭСД в той же области энергий электронов имеет лишь один резонанс (рис. 3 и 12), порог появления которого совпадает с энергией уровня Au $5p_{3/2}$.

Мы полагаем, что в системе Cs–CsAu–W возбуждение уровня Au $5p_{1/2}$ (75 eV) гасится его резонансом с уровнем Cs $4d_{5/2}$ (75 eV), в результате чего состояние с энергией 75 eV частично делокализуется, и вероятность его возбуждения уменьшается, давая вклад лишь в расширение резонансного пика Au $5p_{3/2}$.

ЭР атомов Cs при $T = 300$ К и $E_e = 64$ eV (рис. 4) описываются одной колоколообразной кривой, максимум которой с ростом покрытия цезия от $0.6 \cdot 10^{15}$ до $1.0 \cdot 10^{15}$ at/cm² смещается в сторону меньших энергий от 0.51 до 0.44 eV. Такое смещение ЭР с ростом покрытия характерно для десорбции из атомных субмонослоев и объясняется увеличением латерального отталкивания с ростом покрытия, приводящего к отодвиганию адслоя от подложки и смещению ЭР в меньшие энергии.

Такое поведение ЭР с ростом покрытия цезия может служить лишним указанием на происхождение широкого ВЭ-пика ЭР из атомов субмонослоя цезия по аналогии с ЭСД атомов Na с подложки Na–NaAu–W [7], где кроме широкого ВЭ-пика с максимумом ~ 0.35 eV имелся еще и узкий НЭ-пик с максимумом ~ 0.15 eV с выходом ЭСД атомов Na из сплава NaAu. На рис. 4 для ЭР атомов Cs подобного узкого пика нет.

Однако широкий пик в ЭР атомов Cs с ростом времени напыления золота (рис. 5) расширяется со смещением фронта ЭР в сторону меньших энергий, в то время как при ЭСД атомов Na широкий ВЭ-пик не менялся с ростом времени напыления золота, а смещался в сторону меньших энергий лишь узкий НЭ-пик [7]. Возможно, фронт ЭР на рис. 5 обусловлен другим каналом ЭСД, чем спадающий участок ЭР, и пик в ЭР атомов Cs при $T = 300$ К является составным. Действительно, охлаждение поверхности до 160 К (рис. 6) позволяет разделить широкий пик в ЭР атомов Cs на два пика: узкий НЭ-пик с максимумом ~ 0.36 eV и широкий ВЭ-пик с максимумом ~ 0.46 eV, разделение между которыми по положению максимумов меньше, чем для ЭР атомов Na (~ 0.2 eV) [7]. Из рис. 7 видно, что интенсивность НЭ-пика в 4–5 раз меньше, чем интенсивность ВЭ-пика. Поэтому при повышении температуры расширение пиков приводит к их слиянию в один широкий пик (рис. 4 и 5).

Рис. 8–10 могут служить подтверждением нашей интерпретации в работе [7] механизмов образования ВЭ- и НЭ-пиков в ЭР атомов ЦМ при $E_e = 64$ eV: НЭ-пик образуют атомы ЦМ, происходящие из разрушающихся сплавов CsAu или NaAu, а ВЭ-пик — атомы ЦМ из адслоя ЦМ на поверхности соответствующего сплава. Оба пика возникают в одном и том же процессе возбуждения остоного уровня Au $5p$ в „резонансы“ зоны проводимости, но электроны проводимости, возникающие в результате этого процесса, могут захватываться в различные положения — или ионами адслоя ЦМ,

что дает широкий ВЭ-пик в ЭР, или молекулой сплава, разрушение которой вносит вклад в узкий НЭ-пик в ЭР. Действительно, ВЭ-пик зависит от концентрации адатомов цезия, а НЭ-пик не зависит от нее (рис. 8); тогда как ВЭ-пик не зависит от толщины пленки золота, а НЭ-пик зависит, с увеличением толщины пленки золота смещаясь в сторону меньших энергий (рис. 9) и уменьшая выход (рис. 10). Данное уменьшение выхода в НЭ-пике вызвано, вероятно, диффузией ионов Cs⁺ из верхнего слоя сплава CsAu в лежащие ниже слои и уменьшение концентрации цезия в верхнем слое. В работе [7] аналогичное уменьшение интенсивности НЭ-пика в ЭР атомов Na было гораздо более заметным (рис. 4 в [7]), возможно, за счет большей подвижности ионов Na⁺ в сплаве NaAu.

Понижение температуры поверхности при измерении ЭСД атомов Cs от 300 до 160 К позволило, как и в работе [8] для ЭСД атомов Na, обнаружить еще один резонанс в зависимости выхода $q(E_e)$ с порогом вблизи 24 eV и максимумом при ~ 40 eV (рис. 12). Появление этого резонанса можно объяснить возбуждением остоной оболочка адатома (Cs $5s$ или Na $2p$ в [7]). Механизм десорбции при таком возбуждении остоного экситона в адатоме предложен нами в работе [8] и заключается в том, что возбужденный электрон экситона переходит в зону проводимости подложки, образуя ион Cs²⁺, который за счет увеличения силы изображения и уменьшения отталкивания начинает двигаться к поверхности, где он нейтрализуется и отталкивается от поверхности.

Этот пик существует лишь в узкой области покрытий цезия (рис. 11), появляясь после образования слоя полупроводникового сплава CsAu при $n_{Cs} = 0.5 \cdot 10^{15}$ at/cm². Его интенсивность практически исчезает уже при $n_{Cs} = 0.7 \cdot 10^{15}$ at/cm², вероятно, за счет реионизации атомов Cs при прохождении через адсорбированный слой ионов Cs⁺ [21] от точки нейтрализации иона Cs²⁺, которая находится у поверхности ближе равновесного положения адслоя цезия.

За счет более сильного приближения к поверхности в результате реверсивного движения иона Cs²⁺ энергия отталкивания после нейтрализации иона оказывается больше, чем при нейтрализации иона Cs⁺ из равновесного адслоя. Поэтому в ЭР атомов Cs и наблюдается дополнительный пик с энергией большей, чем энергия максимума широкого ВЭ-пика (рис. 14).

Резкий спад выхода ЭСД с ростом температуры (рис. 13) в канале ЭСД с реверсивным движением возбужденного адатома наблюдался нами ранее при ЭСД атомов Eu и Sm из слоев европия и самария на окисленном вольфраме [24]. В работе [8] мы объяснили такую сильную зависимость выхода ЭСД от температуры в канале ЭСД с реверсивным движением возбужденного иона из адслоя тем, что вероятность всех процессов, определяющих выход ЭСД нейтральных частиц в этом канале (делокализация возбужденного электрона, Оже-нейтрализация адсорбированного иона,

реионизация уходящего с поверхности адатома), сильнее зависит от температуры, чем вероятность тех же процессов при возбуждении атомов подложки (Au [7] или W [24]), так как колебания адатомов ангармоничны и их амплитуды и расстояния до поверхности сильно зависят от температуры. В то же время колебания атомов подложки (Au или W) близки к гармоничным, и их положение в объеме почти не зависит от температуры.

Таким образом, в работе показано следующее.

1) Выход ЭСД атомов Cs с подложки Cs–Au–W существует лишь при покрытиях золота и цезия, больше монослойных.

2) Зависимость выхода ЭСД атомов Cs от энергии бомбардирующих электронов при $T = 300$ К имеет один резонанс шириной ~ 20 eV с максимумом вблизи 64 eV, а при $T < 240$ К в выходе появляется второй резонанс с максимумом вблизи 40 eV, который существует лишь при малых покрытиях в адслое цезия, когда один монослой нанесенного цезия идет на образование сплава CsAu на поверхности вольфрама, покрытого пленкой золота. Первый резонанс мы связываем с возбуждением остоного уровня Au $5p_{3/2}$ подложки, а второй резонанс — с возбуждением $5s$ -состояния в адсорбированном ионе цезия.

3) Возбуждение остоного уровня Au $5p_{3/2}$ приводит к двум механизмам ЭСД атомов Cs из системы Cs–Au–W, которым соответствуют различные по кинетическим энергиям пики в ЭР атомов Cs при $T < 240$ К: широкий ВЭ-пик обусловлен десорбцией атомов Cs из адслоя цезия, а узкий НЭ-пик образуют атомы Cs из разрушающегося при облучении электронами сплава CsAu. При $T = 300$ К оба пика ЭР сливаются в один.

4) Возбуждение остоного уровня Au $5p_{1/2}$, наблюдавшееся нами при ЭСД атомов Na из системы Na–Au–W, в данном случае гасится за счет резонансного перехода электрона с уровня Cs $4d_{5/2}$.

5) Подчеркнем, что резонансная зависимость выхода при ЭСД атомов возникает лишь при возбуждении остоных электронов атомов подложки или адслоя в пики плотности состояний зоны проводимости системы, но не просто ионизацией остоного электрона.

Авторы признательны В.И. Палееву за ценные замечания.

Список литературы

- [1] H.P. Bonzel, A.M. Bradshaw, G. Ertl. *Physics and chemistry of alkali adsorption*. Elsevier, Amsterdam (1989). 486 p.
- [2] X. Zhang, F. Yin, R.E. Palmer, Q. Guo. *Surf. Sci.* **602**, 885 (2008).
- [3] X. Deng, C.M. Friend. *Surf. Sci.* **602**, 1066 (2008).
- [4] Э.Я. Зандберг, М.В. Кнатько, В.И. Палеев, И.Д. Пелехатый, М.М. Суших. *Письма в ЖТФ* **21**, 15 (1995).
- [5] J.L. LaRue, J.D. White, N.H. Nahler, Z. Liu, Y. Sun, P.A. Pianetta, D.J. Auerbach, A.M. Wodtke. *J. Chem. Phys.* **129**, 024 709 (2008).
- [6] V.N. Ageev. *Progr. Surf. Sci.* **47**, 55 (1994).
- [7] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Н.Д. Потехина. *ФТТ* **50**, 1524 (2008).
- [8] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Н.Д. Потехина. *ФТТ* **51**, 2, 393 (2009).
- [9] В.Н. Агеев, О.П. Бурмистрова, Ю.А. Кузнецов. *ФТТ* **29**, 1740 (1987).
- [10] Э.Я. Зандберг, Н.И. Ионов. *Поверхностная ионизация*. Наука, М. (1969). 432 с.
- [11] В.Н. Агеев, Н.И. Ионов, Б.К. Медведев, Б.В. Якшинский. *ФТТ* **20**, 1334 (1978).
- [12] Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Под ред. Д. Бриггса, М.П. Сиха. Мир, М. (1987). С. 570.
- [13] E. Bauer, T. Bonczek, H. Poppa, G. Todd. *Surf. Sci.* **53**, 87 (1975).
- [14] G.K. Wertheim, D.N.E. Buchanan, V. Lee. *Phys. Rev. B* **34**, 6869 (1986).
- [15] C. Koenig, N.E. Christensen, J. Kollar. *Phys. Rev. B* **29**, 6481 (1984).
- [16] М.В. Кнатько, М.Н. Лапушкин, В.И. Палеев. *Письма в ЖТФ* **24**, 48 (1998).
- [17] В.Н. Агеев, Е.Ю. Афанасьева. *ФТТ* **48**, 2217 (2006).
- [18] E. Wimmer. *J. Phys. F* **13**, 2313 (1983).
- [19] H. Ishida. *Phys. Rev. B* **38**, 8006 (1988).
- [20] P. Soukiassian, M.H. Bakshi, Z. Hurych, T.M. Gentle. *Surf. Sci.* **221**, L 759 (1989).
- [21] V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, T.E. Madey. *J. Vac. Sci. Technol. A* **19**, 1489 (2001).
- [22] М.В. Кнатько, М.Н. Лапушкин, В.И. Палеев. *ЖТФ* **68**, 108 (1998).
- [23] A. Mori, Y. Kayanuma, A. Kotani. *Progr. Theor. Phys. Suppl.* **106**, 75 (1991).
- [24] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Н.Д. Потехина. *ФТТ* **46**, 945 (2004).
- [25] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Н.Д. Потехина. *ФТТ* **49**, 1514 (2007).