

Температурные и концентрационные эффекты в электронно-стимулированной десорбции атомов натрия из слоев натрия, 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,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: kuznets@ms.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 28 декабря 2007 г.)

Впервые измерены выход и энергораспределения атомов натрия при электронно-стимулированной десорбции (ЭСД) из слоев натрия, адсорбированных на вольфраме, покрытом пленкой золота, в зависимости от толщины пленки золота, концентрации напыленного натрия и температуры поверхности. Обнаружены два пика в энергораспределениях: узкий пик с максимумом около 0.15 eV, интенсивность которого непрерывно возрастает с ростом температуры, и широкий пик с максимумом около 0.35 eV, интенсивность которого уменьшается или постоянна с ростом температуры. Показано, что оба пика возникают за счет одного и того же возбуждения, которое дает разные каналы ЭСД атомов Na. Обсуждаются возможные механизмы ЭСД и кинетика разрушения поверхностного покрытия.

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

Электронно-стимулированная десорбция (ЭСД) широко используется для анализа и модификации адсорбированных слоев [1]. Однако имеется недостаток надежных измерений десорбирующихся потоков нейтральных частиц, что сдерживает построение детальных моделей этого процесса.

Мы впервые применили метод поверхностной ионизации (ПИ) для измерения потоков нейтральных частиц при ЭСД и времяпролетный метод для регистрации энергораспределений (ЭР) нейтральных частиц в этом явлении [2]. Адсорбатом служил натрий, осажденный на поверхность золотой пленки, напыленной на текстурированную вольфрамовую ленту. Первый слой золота прочно связан с вольфрамом и эпитаксиально растет на грани W(100), а сверх монослоя золото образует разупорядоченные кристаллиты с объемными свойствами [3,4]. Натрий, осажденный на золоте в количестве больше монослоя, образует сплав NaAu, который обладает полупроводниковой проводимостью [5,6]. ЭСД атомов Na наблюдается только после образования полупроводниковой пленки, на которой возбужденные состояния имеют время жизни, достаточное для десорбции [7].

Кинетика формирования сплава NaAu определяется проникновением натрия в золото и зависит от температуры подложки. Таким образом, изучая температурную зависимость выхода ЭСД атомов Na, можно получить сведения об образовании пленки Na_xAu_y , о ее структуре и кинетике изменения со временем при повышении температуры до 500 К, температуры устойчивости пленки натрия на золоте.

2. Экспериментальная техника

Экспериментальный прибор и методика измерений подробно описаны ранее [2]. Выход и энергораспределения атомов Na измерены времяпролетным методом при облучении мишени импульсами электронов длительностью $1 \mu\text{s}$ с частотой 1 kHz. Стационарная плотность тока бомбардирующих электронов не превышала $5 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ при ускоряющем напряжении $\sim 200 \text{ eV}$ и не вызывала заметного нагрева мишени.

Регистрация атомов Na осуществлялась с помощью детектора на основе поверхностной ионизации, в котором эмиттером служила иридиевая лента, нагретая до $T = 1800 \text{ K}$. В качестве мишени использовалась текстурированная вольфрамовая лента размером $70 \times 2 \times 0.01 \text{ mm}$ с преимущественным выходом на поверхность грани (100). Текстурирование ленты производилось путем ее нагрева до $T = 2000 \text{ K}$ переменным током в течение 5 h. Очистка ленты от углерода выполнялась по стандартной процедуре путем ее прокалывания при $T = 1800 \text{ K}$ и давлении кислорода $p(\text{O}_2) = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Torr}$ в течение 3 h.

Золото напылялось на ленту при $T = 300 \text{ K}$ из прямонакальной вольфрамовой трубки, в которую помещались кусочки Au чистотой 99.99%. Имелось несколько отверстий по длине трубки для равномерного напыления золота вдоль ленты. Концентрация напыленного золота определялась по времени напыления и контролировалась по выходу ионов Na^+ при ПИ после адсорбции кислорода на поверхности Au/W для проверки отсутствия участков, свободных от золота.

Натрий осаждался на ленту при $T = 300$ К постоянным потоком атомов из прямонакального испарителя путем термического разложения хромата натрия. Концентрация натрия на поверхности ленты определялась по времени напыления постоянным потоком, интенсивность которого измерялась по току ПИ натрия на окисленной поверхности вольфрама. Давление остаточных газов в приборе не превышало $5 \cdot 10^{-10}$ Торг.

Лента-мишень 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, 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.

3. Результаты

Спектр термодесорбции атомов Na из системы Na–Au–W связан с десорбцией атомов Na из монослоя, из слоя полупроводника Na_xAu_y и из конденсированного слоя натрия [8]. Бомбардировка электронами слоя натрия, адсорбированного на вольфраме, покрытом пленкой золота, может приводить к десорбции атомов Na. Зависимость выхода ЭСД атомов Na от энергии электронов имеет резонансный характер с максимумами при энергиях электронов 64 и 82 eV [9], которые близки к энергиям основных уровней золота $5p_{3/2}$ и $5p_{1/2}$ [10] (рис. 1). ЭР при ЭСД атомов Na состоят из двух колоколообразных кривых с максимумами при энергиях 0.15 и 0.35 eV [9]. Узкий пик с максимумом при 0.15 eV

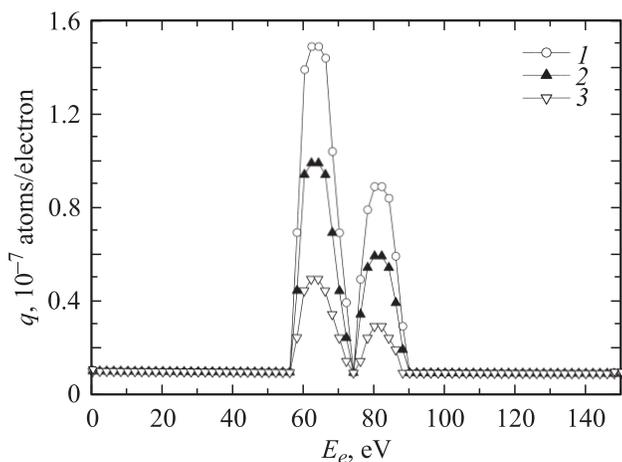


Рис. 1. Выход q атомов Na в зависимости от энергии бомбардирующих электронов E_e для 2 ML золота, нанесенных на вольфрам при $T = 300$ К. 1 — полный, 2 — в ВЭ-пике ЭР, 3 — в НЭ-пике ЭР. Концентрация натрия $1.2 \cdot 10^{15}$ at/cm².

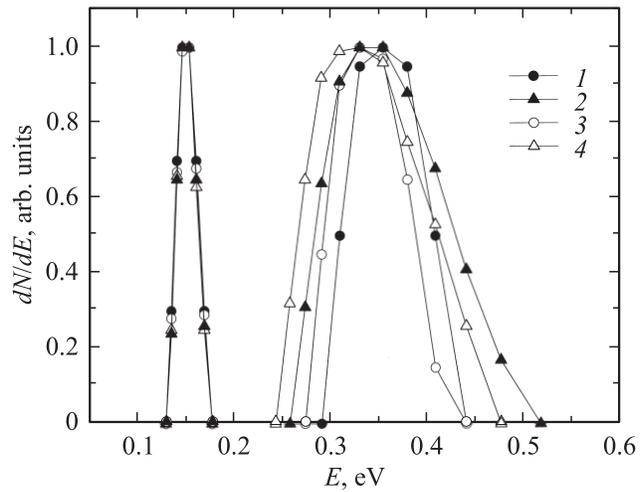


Рис. 2. Нормированные ЭР при ЭСД атомов Na из слоев, напыленных на пленку золота толщиной 2 ML при $T = 300$ К. Концентрация атомов Na: $1.2 \cdot 10^{15}$ (1, 2) и $1.6 \cdot 10^{15}$ at/cm² (3, 4). Температура поверхности во время измерения: 300 (1, 3) и 500 К (2, 4). Энергия электронов 64 eV.

расположен в области низких энергий (НЭ-пик), а широкий пик с максимумом при 0.35 eV находится в области более высоких энергий (ВЭ-пик) (рис. 2). Интересно, что возбуждение в каждом из резонансов выхода (64 и 82 eV) приводит к появлению обоих пиков в ЭР. При этом интенсивность ВЭ-пика в 2 раза больше, чем НЭ-пика в каждом из резонансов (рис. 1). На рис. 2 приведены ЭР атомов Na для разных концентраций натрия, напыленного на вольфрам, покрытый пленкой золота толщиной ~ 2 ML, и для разных температур поверхности во время измерения. Видно, что форма и положение НЭ-пика не зависят ни от концентрации напыленного натрия, ни от температуры поверхности, а ВЭ-пик смещается в сторону меньших энергий с ростом концентрации натрия и расширяется с ростом температуры.

В работе [9] мы предположили, что ВЭ-пик в ЭР связан с ЭСД нейтральных атомов Na, а НЭ-пик — с ЭСД молекул NaAu. В настоящей работе мы покажем, что хотя НЭ-пик появляется в результате разрушения связи молекулы NaAu из слоя полупроводника с подложкой, с поверхности слетают, вероятнее всего, атомы Na после диссоциации молекулы на поверхности. Для простоты в дальнейшем мы продолжим называть этот пик „молекулярным“, происходящим из NaAu.

На рис. 3 представлена зависимость ЭСД выхода атомов Na в НЭ- и ВЭ-пиках ЭР от концентрации натрия, нанесенного на вольфрам, покрытый пленкой золота толщиной ~ 2 ML. Выход ЭСД атомов Na появляется только после нанесения монослоя натрия ($\sim 0.8 \cdot 10^{15}$ cm⁻²) на 2 ML Au/W, затем растет до нанесения второго монослоя натрия ($\sim 1.6 \cdot 10^{15}$ cm⁻²), после чего уменьшается как для ВЭ-пика, так и для НЭ-пика. Изменения выхода с ростом концентрации натрия в обоих пиках происходят синхронно.

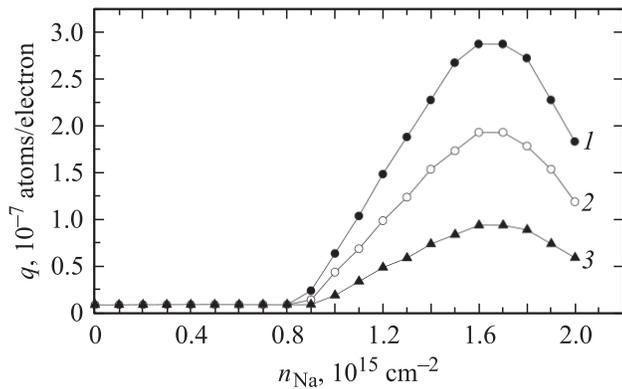


Рис. 3. Выход q атомов Na в зависимости от концентрации натрия n_{Na} , нанесенного на двухслойную пленку золота на вольфраме при $T = 300$ К: 1 — полный, 2 — в ВЭ-пике ЭР, 3 — в НЭ-пике ЭР. Энергия электронов 64 eV.

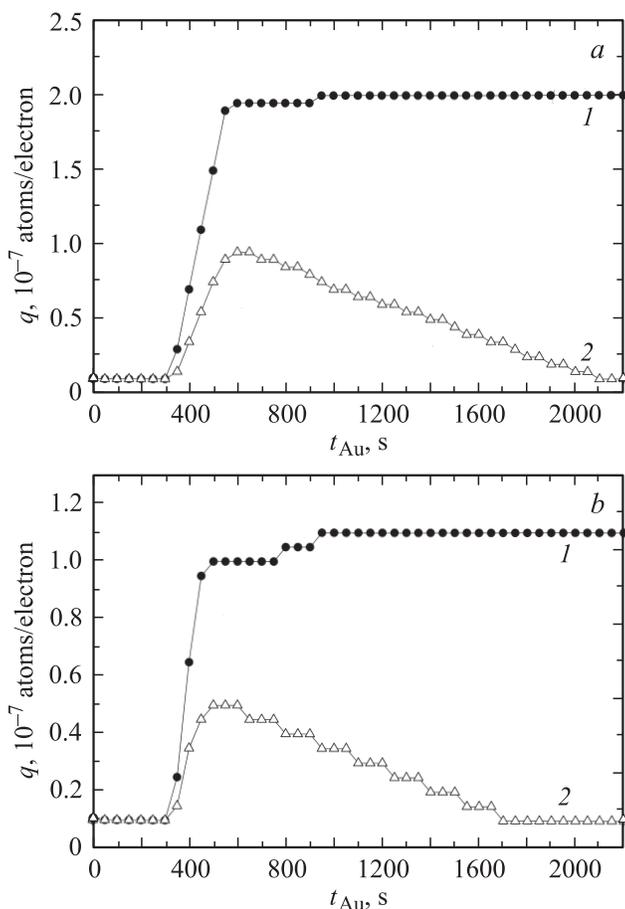


Рис. 4. Выход q атомов Na в ВЭ- (1) и НЭ- (2) пиках ЭР при $T = 300$ К в зависимости от времени напыления пленки золота t_{Au} для двух концентраций натрия. n_{Na} , 10^{15} ат/см²: а — 1.6, б — 1.2. Энергия электронов 64 eV.

На рис. 4 показано изменение выхода ЭСД в НЭ- и ВЭ-пиках с ростом времени напыления пленки золота на вольфрам, т.е. зависимость выхода ЭСД атомов Na в НЭ- и ВЭ-пиках от толщины пленки золота. Видно, что

выход ЭСД атомов Na в ВЭ-пике от толщины пленки золота практически не зависит, а интенсивность НЭ-пика уменьшается с увеличением толщины пленки золота.

На рис. 5 дана зависимость нормированного ЭР атомов Na от толщины пленки золота. Здесь, наоборот, форма и положение ВЭ-пика не зависят от времени напыления золота, а положение НЭ-пика смещается в сторону меньших энергий при неизменности формы пика.

На рис. 6, 7 показаны изменения выхода ЭСД в НЭ- и ВЭ-пиках ЭР и полного выхода ЭСД от времени нагрева пленки, образованной при 300 К. На рис. 6 представлены результаты изменений выхода при $T = 400$ К для пленок с разной концентрацией натрия. Видно, что с увеличе-

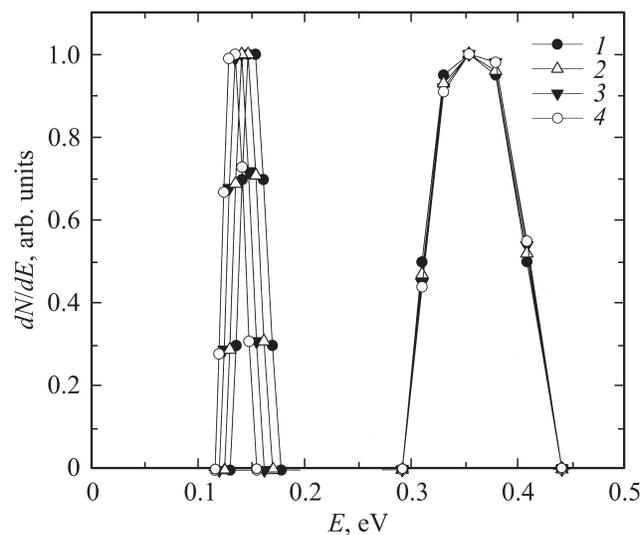


Рис. 5. Нормированные ЭР при ЭСД атомов Na при $T = 300$ К и концентрации натрия $1.2 \cdot 10^{15}$ ат/см² для различных времен напыления пленки золота. t_{Au} с: 1 — 600, 2 — 900, 3 — 1200, 4 — 1500. Энергия электронов 64 eV.

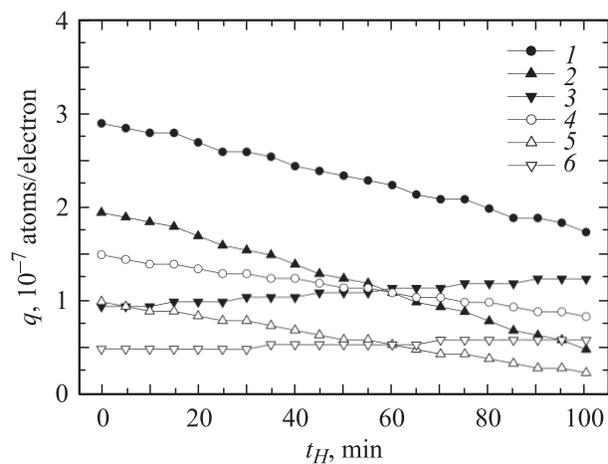


Рис. 6. Выход q атомов Na при $T = 400$ К — полный (1, 4), в ВЭ- (2, 5) и НЭ- (3, 6) пиках ЭР — в зависимости от времени нагрева t_H двухслойной пленки золота, нанесенной на вольфрам при 300 К, для двух концентраций натрия. n_{Na} , 10^{15} ат/см²: 1–3 — 1.6, 4–6 — 1.2. Энергия электронов 64 eV.

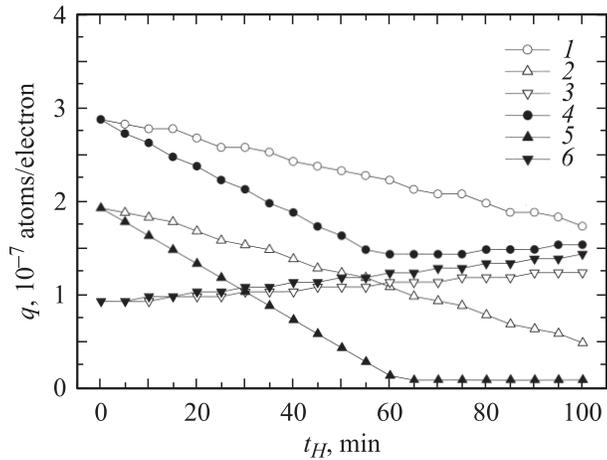


Рис. 7. Выход q атомов Na при концентрации натрия $1.6 \cdot 10^{15}$ at/cm² — полный (1, 4), в ВЭ- (2, 5) и НЭ- (3, 6) пиках ЭР — в зависимости от времени нагрева t_H двухмонослойной пленки золота, нанесенной на вольфрам при 300 К, для двух температур нагрева. T , К: 1–3 — 400, 4–6 — 500. Энергия электронов 64 eV.

нием количества натрия выход ЭСД увеличивается, а скорость изменения выхода пропорциональна времени нагрева и не зависит от количества напыленного натрия. На рис. 7 изображены зависимости изменений выхода ЭСД в НЭ- и ВЭ-пиках ЭР и полного выхода ЭСД от времени нагрева пленки для пленки с концентрацией натрия ~ 2 ML при разных температурах нагрева 400 и 500 К.

Из рис. 6, 7 видно, что с ростом времени нагрева интенсивность ВЭ-пика уменьшается, а интенсивность НЭ-пика растет. С увеличением температуры нагрева (рис. 7) скорости изменений выхода в зависимости от времени нагрева увеличиваются. При 400 К ВЭ-пик уменьшается в 2 раза за 100 min нагрева, а при 500 К уже через 60 min интенсивность ВЭ-пика уменьшается до фонового значения, хотя НЭ-пик продолжает расти.

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 образует разупорядоченные кристаллиты с объемными свойствами [3,4]. Напыление натрия на пленку золота, нанесенную на вольфрам, сопровождается понижением работы выхода на 1.9 eV [11] и приводит к образованию трех фаз десорбции, которые приписываются формированию последовательно монослоя натрия, соединения Na_xAu_y и толстой пленки натрия [8]. Выход атомов Na при ЭСД коррелирует с образованием соединения Na_xAu_y , которое появляется после заполнения монослоя натрия и для формирования которого необходима пленка золота толщиной больше монослоя.

Приведенный на рис. 1 резонансный тип зависимости выхода атомов Na при ЭСД от энергии электронов впервые был обнаружен при ЭСД атомов европия из адслоев европия на поверхности окисленного вольфрама [12,13] и объяснен в работах [14–16] возникновением остовных экситонов $5p \rightarrow 5d_{\text{exc}}$ в адслоях редкоземельных металлов, а также возбуждением остовных электронов $5p$ -, $5s$ -вольфрама в антисвязанные состояния, имеющие большой пик плотности состояний в области незанятых $5d$ -орбиталей зоны проводимости вольфрама [17]. Возбуждение экситонов в европии и самарии приводило к десорбции атомов Eu и Sm при ЭСД, а возбуждение уровня $5p$ вольфрама — к десорбции молекул EuO и SmO [12–16].

В системе Na–Au–W все незанятые состояния зоны проводимости образуются гибридизацией орбиталей $6s6p$ - $5d$ Au, W и $3s3p$ Na. Большой пик плотности состояний связан здесь также со свободными $5d$ -орбиталями W(100) [17]. При гибридизации с золотом эти состояния играют главную роль, так как золото имеет замкнутую $5d^{10}$ -оболочку и вклад $5d$ Au-состояний в зону проводимости как чистого золота, так и сплава NaAu очень мал. Действительно, расчет [18] показал, что структура зоны проводимости сплава NaAu не имеет никаких острых пиков плотности состояний и образуется s -, p -электронами натрия и золота. Объединенная система Na–Au–W должна иметь острые пики плотности незанятых состояний, происходящие от шести свободных $5d$ W-орбиталей. Действительно, даже пик $E_v = -0.3$ eV в плотности состояний валентной зоны W(100) не гасится напылением золота до покрытия 1.15 ML [19]. В работе [19] предполагается, что поверхностный резонанс вольфрама может быть перенесен во внешний слой, даже если этот слой не образован вольфрамом. Тем более это относится к широкому, размазанному в пространстве, возбужденным состояниям.

Возбуждения остовных электронов $5p_{3/2}$ и $5p_{1/2}$ Au в эти состояния с большим вкладом $5d$ W-орбиталей и дают наблюдаемые резонансы выхода ЭСД с максимумами 64 и 82 eV, близкие к положению уровней $5p_{3/2}$ и $5p_{1/2}$ Au (57 и 75 eV [10]). В результате этого возбуждения в системе образуется дырка $5p$ Au и антисвязанное возбужденное состояние с локализацией электрона вблизи вольфрама и с ослабленными связями между первым слоем золота на вольфраме и молекулой сплава NaAu. Подтверждением этих предположений являются зависимости выхода ЭСД и ЭР атомов Na от толщины пленки золота: уменьшение выхода (рис. 4) и сдвиг ЭР в сторону меньших энергий (рис. 5).

В работе [9] мы предположили, что ВЭ-пик в ЭР связан с десорбцией атомов Na, а НЭ-пик — с ЭСД молекул NaAu. Однако, вероятнее всего, слет молекул как целого невозможен как из энергетических соображений (кинетическая энергия молекулы за измеренное время пролета должна была бы быть равной ~ 1.5 eV, что маловероятно), так и исходя из большой вероятности диссоциации молекул NaAu на поверхности. Поэтому

мы приходим к выводу, что НЭ-пик связан с десорбцией возбужденных атомов Na, появившихся в результате распада антисвязывающих орбиталей в соединении Na_xAu_y или в результате распада на поверхности возбужденной молекулы NaAu^* . ЭСД атомов Na в ВЭ-пике происходит благодаря нейтрализации ионов натрия, находящихся на поверхности полупроводника Na_xAu_y , свободными электронами. Они появляются в зоне проводимости после Оже-нейтрализации $5p$ -дырки в золоте, образованной электронным ударом. Образованный из иона Na^+ атом натрия имеет в 2 раза больший радиус, за счет чего отталкивается от поверхности и слетает, давая вклад в ВЭ-пик ЭР. Вероятность образования ВЭ-пика из частиц адсорбированного слоя в 2 раза больше вероятности десорбции Na после возбуждения антисвязывающей орбитали в слое полупроводника Na_xAu_y , судя по соотношению интенсивности ВЭ- и НЭ-пиков, равному примерно двум, на рис. 1. Оба канала ЭСД возникают одновременно при возбуждении как $5p_{3/2}$ Au, так и $5p_{1/2}$ Au.

С ростом толщины пленки золота на вольфраме (рис. 4) выход ЭСД, связанный с ВЭ-пиком, не меняется по интенсивности, а интенсивность НЭ-пика спадает. Это не противоречит нашей модели, в которой при возбуждении уровня $5p$ Au электрон с золота с наибольшей вероятностью переходит в состояние с максимумом плотности вблизи вольфрама, так как в зоне проводимости большой пик плотности состояний связан именно со свободными и сильно локализованными $5d$ -состояниями вольфрама [17]. Вероятность такого возбуждения падает с ростом толщины пленки золота. Кроме того, вышележащие слои золота отдаляют молекулу NaAu от места возбуждения, связь молекулы NaAu с подложкой уменьшается в возбужденном состоянии в меньшей степени, чем в монослое NaAu рядом с Au/W, и кинетическая энергия оторвавшейся молекулы становится меньше, сдвигая НЭ-пик в сторону меньших энергий (рис. 5).

Вместе с тем число свободных электронов, возникающих при возбуждении $5p$ Au электрона, остается тем же при разной толщине слоя золота, так как зависит главным образом от величины энергии возбуждения, а следовательно, они смогут нейтрализовать то же количество адсорбированных ионов Na^+ , дающих ВЭ-пик в ЭР (рис. 4). Неизменность формы и положения ВЭ-пика в зависимости от толщины слоя золота дает дополнительный аргумент в пользу предположения, что ЭСД атомов Na происходит из адсорбированного слоя натрия, а не за счет выхода растворенных в полупроводнике примесей Na.

Уменьшение интенсивности НЭ-пика из соединения Na_xAu_y с ростом слоя золота кроме названной выше причины вызывается также возможной диффузией Na^+ из слоя сплава NaAu в нижележащие слои золота, что смещает, размывает и постепенно разрушает слой полупроводника, особенно при повышении температуры подложки. Это подтверждается данными рис. 4, где при меньшем количестве нанесенного натрия быстрее разрушается слой NaAu , так как при этом уменьшается

и толщина слоя сплава. С разрушением полупроводника освобождаемый натрий диффундирует не только в нижележащие слои Au/W, но и к поверхности, увеличивая тем самым выход в ВЭ-пике. Неизменность формы ВЭ-пика с ростом толщины слоя золота подтверждает гипотезу о том, что вклад в ВЭ-пик дают атомы, находящиеся на поверхности, а не приходящие из объема.

Из рис. 6 и 7 видно, что за время нагрева покрытия $\text{Na}/\text{Au}/\text{W}$, образованного при $T = 300$ К последовательным напылением на вольфрам двух монослоев золота и слоя натрия (≥ 1 ML), полный выход ЭСД натрия уменьшается за счет уменьшения интенсивности ВЭ-пика, хотя НЭ-пик немного растет с ростом времени нагрева. Спад выхода в ВЭ-пике ЭР линеен со временем нагрева t_H и подчиняется формуле

$$q_{\text{HE}}(t_H) = q_{\text{HE}}(0)(1 - Ct_H),$$

где коэффициент C не зависит от концентрации напыленного натрия, но растет с ростом температуры: $C(400 \text{ K}) = 1.25 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; $C(500 \text{ K}) = 2.78 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Если предположить, что зависимость $C(T)$ — бoльцмановская, т.е. $C(T) = C_0 \exp(-\Delta E/kT)$, то оценка энергии активации процесса уменьшения выхода в ВЭ-пике со временем нагрева дает величину $\Delta E = 0.14 \text{ eV}$ при $C_0 = 0.68 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. Эти значения показывают, что уменьшение $q_{\text{HE}}(t_H)$ не может быть объяснено диффузией натрия с поверхности в объем, так как оценки энергий диффузии натрия сквозь разрушающийся слой сплава NaAu и энергий активации распада сплава давали в работах [6,7] величины $3.16\text{--}3.20 \text{ eV}$ при $C_0 = 10^{12} \text{ s}^{-1}$. С этими значениями параметров при $T = 400\text{--}500 \text{ K}$ диффузия натрия за измеряемое время наблюдаться не может.

Здесь, вероятнее всего, происходит „реакционная диффузия“, когда адсорбированный ион Na^+ реагирует с Au^- из сплава NaAu , за счет чего на поверхности оказывается вместо Na^+ молекула NaAu , которая распадается, а оставшийся Na^+ из сплава остается в объеме. Тогда постепенно количество натрия в адслое снижается уменьшая $q_{\text{HE}}(t_H)$, а выход натрия из слоя сплава NaAu в возбужденном состоянии увеличивается, приводя к росту $q_{\text{LE}}(t_H)$. Этот процесс связан с изменением электронных состояний, а не с перемещением атомов.

Возможно аналогичный процесс, связанный с перескоками электронов, отвечает и за фотостимуляцию ПИ натрия из золота с напыленным слоем натрия в работах [5–7], когда мгновенно, за время меньше 0.1 s увеличивается ток ПИ при освещении поверхности Na/Au светом с $h\nu > 2.8 \text{ eV}$.

При $T = 500 \text{ K}$ за время нагрева 60 min ВЭ-пик исчезает, что свидетельствует об исчезновении адсорбированного слоя натрия за счет его реакций с нижележащим Au^- из сплава NaAu . Это согласуется с результатами работы [20], где найдено, что при $T > 600 \text{ K}$ взаимодействие золота с адсорбированным натрием постепенно увеличивает работу выхода золота на 0.4 eV , что объясняется выходом на поверхность Au^- и уходом Na^+ в объем.

Уменьшение выхода ЭСД при напылении слоя натрия с концентрацией больше $\sim 2 \text{ ML}$ (рис. 3), при которой достигнут максимум зависимости выхода от количества натрия, может быть объяснено металлизацией слоя натрия с ростом покрытия натрия как для ВЭ-, так и для НЭ-пиков. Синхронность изменения зависимости выхода от количества натрия для обоих пиков подтверждает наше предположение о том, что в обоих каналах ЭСД десорбируются атомы Na, одинаково чувствующие влияние металлизации адслоя на величину выхода ЭСД.

Подведем некоторые итоги. ЭСД атомов Na с поверхности вольфрама, покрытого слоем золота, возникает, только если покрытия золота и натрия больше монослоя [9]. Выход ЭСД атомов Na в зависимости от энергии электронов имеет резонансный характер с двумя максимумами — 64 и 82 eV (рис. 1). ЭР десорбирующихся частиц также состоят из двух максимумов, узкого с кинетической энергией атома Na $\sim 0.15 \text{ eV}$ (НЭ-пик) и широкого с кинетической энергией атома Na $\sim 0.35 \text{ eV}$ (ВЭ-пик) (рис. 2) [9].

Анализ изменений положения и формы этих пиков ЭР в зависимости от концентрации напыляемых натрия и золота и температуры подложки, а также анализ выхода в каждом из пиков ЭР при изменении концентрации натрия и золота и времени нагрева поверхности при 400 и 500 К позволили нам предположить, что широкий ВЭ-пик в ЭР связан с ЭСД нейтральных атомов натрия из адсорбированного слоя натрия, а узкий НЭ-пик связан с возбуждением и распадом молекул NaAu из полупроводникового слоя Na_xAu_y .

Показано, что одно и то же возбуждение в каждом из резонансов выхода (64 и 82 eV) дает одновременную десорбцию атомов Na как и адслоя натрия (ВЭ-пик), так и в результате возбуждения и распада сплава NaAu (НЭ-пик).

Это отличается от ранее наблюдавшейся нами ЭСД атомов Eu и Sm с поверхности окисленного вольфрама [14,15]. В последнем случае зависимость выхода от энергии электронов тоже имела резонансный характер с несколькими пиками, но выход ЭСД атомов Eu и Sm и молекул EuO и SmO стимулировался возбуждением в разных интервалах энергий. Атомы Eu и Sm десорбировались после возбуждения остовных уровней $5p$ Eu и Sm, а молекулы EuO и SmO десорбировались после возбуждения остовных электронов подложки, $5s$ - и $5p$ -вольфрама, в антисвязанное состояние системы вольфрам–кислород–РЗМ.

Здесь же, в системе натрий–золото–вольфрам оба канала ЭСД, атомный и „молекулярный“, связаны с одним и тем же возбуждением $5p$ -электрона золота в незанятые состояния $5d$ W зоны проводимости системы. Это возбуждение создает антисвязанные состояния с остовой вакансией $5p$ Au, а заполнение вакансии приводит к каскаду Оже-процессов, в результате которых появляются свободные электроны, нейтрализующие адсорбированные ионы Na^+ на поверхности. Распад антисвязанного состояния пленки сплава дает НЭ-пик в ЭР, а нейтрализация ионов Na^+ на поверхности сплава — ВЭ-пик в ЭР.

Нагрев покрытия Na/Au/W, образованного при 300 К, до 400 или 500 К приводит к заметному уменьшению со временем выхода атомов Na в ВЭ-пике ЭР и небольшому росту выхода в НЭ-пике. Из анализа этих зависимостей мы пришли к выводу, что уход атомов Na с поверхности сплава происходит в результате электронных процессов, связанных с перераспределением электронов между натрием и золотом в адслое и слое полупроводника и приводящих к переходу от покрытия сплава NaAu атомами натрия (при 300 К) к преимущественному выходу на поверхность слоя сплава и уходу натрия в объем (при $T > 400 \text{ K}$).

Итак, в работе обнаружен новый канал ЭСД атомов с поверхности полупроводникового слоя на металле в дополнение к рассмотренным нами ранее трем каналам ЭСД в трех типах зависимостей выхода ЭСД нейтральных частиц от энергии бомбардирующих электронов [21], связанный с нейтрализацией адсорбированных ионов свободными электронами, возникающими после возбуждения остовных уровней подложки.

Авторы выражают признательность В.И. Палееву за полезные замечания и консультацию.

Список литературы

- [1] V.N. Ageev. Progr. Surf. Sci. **47**, 55 (1994).
- [2] В.Н. Агеев, О.П. Бурмистрова, Ю.А. Кузнецов. ФТТ **29**, 1740 (1987).
- [3] E. Bauer, T. Boncerek, H. Poppa, G. Todd. Surf. Sci. **53**, 87 (1975).
- [4] G.K. Wertheim, D.N.E. Buchanan, V. Lee. Phys. Rev. B **34**, 6869 (1986).
- [5] Э.Я. Зандберг, М.В. Кнатько, В.И. Палеев, И.Д. Пелехатый, М.М. Суших. Письма в ЖТФ **21**, 15 (1995).
- [6] М.В. Кнатько, В.И. Палеев, М.Н. Лапушкин. ЖТФ **68**, 104 (1998).
- [7] М.В. Кнатько, М.Н. Лапушкин, В.И. Палеев. ЖТФ **68**, 108 (1998).
- [8] В.Н. Агеев, Е.Ю. Афанасьева. ФТТ **48**, 2217 (2006).
- [9] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов. ФТТ **50**, 364 (2008).
- [10] Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Под ред. Д. Бриггса, М.П. Сиха. Мир, М. (1987). С. 567.
- [11] A. Neumann, S.L.M. Schroeder, K. Shristmann. Phys. Rev. B **51**, 17017 (1995).
- [12] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов. Письма в ЖТФ **26**, 86 (2000).
- [13] V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, T.E. Madey. J. Vac. Sci. Technol. A **19**, 1489 (2001).
- [14] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Н.Д. Потехина. ФТТ **43**, 1894 (2001).
- [15] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Н.Д. Потехина. ФТТ **45**, 929 (2003).
- [16] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Н.Д. Потехина. ФТТ **46**, 945 (2004).
- [17] L.F. Mattheis, D.R. Hamann. Phys. Rev. B **29**, 5372 (1984).
- [18] C. Koenig, N.E. Christensen, J. Kollar. Phys. Rev. B **29**, 6481 (1984).
- [19] L. Richter, R. Gomer. Phys. Rev. Lett. **37**, 763 (1976).
- [20] M.V. Knaf'ko, V.I. Paleev, E.Ya. Zandberg. Phys. Low-Dim. Struct. **7/8**, 27 (1996).
- [21] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Н.Д. Потехина. ФТТ **49**, 1514 (2007).