

Электронно-стимулированная десорбция атомов натрия из слоев натрия, адсорбированных на пленке золота

© В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов

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

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

(Поступила в Редакцию 27 июня 2007 г.)

Впервые измерены выход и энергораспределения при электронно-стимулированной десорбции (ЭСД) атомов натрия из слоев натрия, адсорбированных на вольфраме, покрытом пленкой золота, в зависимости от энергии бомбардирующих электронов, толщины пленки золота и количества адсорбированного натрия. Впервые обнаружен канал ЭСД, связанный с возбуждением остовных уровней золота.

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, адсорбированные на подложке из золота (Au) при комнатной или повышенных температурах, образуют в приповерхностной области сплавы, которые в зависимости от природы щелочного металла обладают электронными свойствами, существенно отличающимися от свойств металлов, составляющих сплав [1]. Проводимость сплавов изменяется от металлической до полупроводниковой. Наиболее широкозонным проводником является сплав цезий–золото (~ 2.6 eV) [2]. Сплав рубидий–золото имеет более узкую запрещенную зону [3], а сплавы Au с калием, натрием и литием, как показывают расчеты, должны иметь металлические свойства, если они образуют кристаллическую структуру аналогичную CsCl [4,5].

Однако между адсорбированным слоем натрия и приповерхностной областью золота была обнаружена фотостимулированная диффузия атомов натрия (Na), указывающая на полупроводниковую природу образующегося соединения [6,7]. Действительно, возникновение фотостимулированной диффузии в металлопленочных системах маловероятно из-за малости времени релаксации электронных возбуждений в таких системах [8]. В то же время термоионная эмиссия с поверхности пленки сплава NaAu определяется последовательностью процессов диффузии атомов Na в глубь пленки, ионизацией их на границе металла, диффузией ионов к поверхности и десорбцией [9].

Атомы Na, осажженные на поверхность золота при температуре $T = 300$ K, термически десорбируются в трех фазах, связанных с образованием монослойного покрытия, соединения NaAu и многослойной пленки Na [10]. Если соединение NaAu является полупроводниковым, то время жизни возбужденных состояний в нем может быть достаточно большим для электронно-стимулированной десорбции (ЭСД) атомов Na. Целью настоящей работы было изучение ЭСД атомов Na из пленки Na, адсорбированной на пленке Au, нанесенной на текстурированную ленту вольфрама при $T = 300$ K.

2. Экспериментальная техника

Экспериментальный прибор и методика измерений подробно описаны ранее [11]. 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 $5 \cdot 10^{-6}$ A/cm² при ускоряющем напряжении ~ 200 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 $T = 1800$ K. В качестве мишени использовалась 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 $T = 2000$ K переменным током в течение 5 h. Очистка ленты от углерода выполнялась по стандартной процедуре путем ее прокаливания при $T = 1800$ K и давлении кислорода $p(\text{O}_2) = 1 \cdot 10^{-6}$ Torr в течение 3 h.

Золото напылялось на ленту из прямонакальной 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 поверхности вольфрама, свободной от золота.

Натрий осаждался на ленту при $T = 300$ K 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 поверхностной ионизации натрия в насыщении. Давление остаточных газов в приборе не превышало $5 \cdot 10^{-10}$ Torr.

3. Результаты

Бомбардировка электронами слоя натрия, адсорбированного при $T = 300$ К на поверхности вольфрама, покрытого пленкой золота, приводит к десорбции атомов Na. Это несколько неожиданный результат, потому что ЭСД из металлопленочных систем неэффективна из-за слишком малых времен жизни возбужденных состояний в таких системах. Выход q атомов Na зависит от толщины напыленной пленки золота. На рис. 1 приведены графики зависимости выхода q атомов Na для трех концентраций натрия, напыленного на пленку золота при $T = 300$ К, от времени напыления золота. Задержка в появлении выхода q атомов Na связана как с запаздыванием начала испарения золота из источника вследствие инерционности его нагрева, так и с недостатком концентрации натрия на поверхности золота. Порог появления выхода q атомов Na соответствует примерно нанесению монослоя золота и образованию на поверхности монослойной пленки натрия (кривая 2). За порогом следует линейное возрастание выхода q атомов Na со временем напыления золота, который достигает максимума примерно при двух монослоях золота. Плавное уменьшение выхода q атомов Na с ростом толщины пленки золота после максимума выхода q атомов Na, по-видимому, вызвано уменьшением вклада в возбуждение золота обратно рассеянных электронов.

На рис. 2 (кривая 1) изображен полный выход q атомов Na от энергии бомбардирующих электронов E_e для двух слоев золота, нанесенных на вольфрам при $T = 300$ К, и покрытых двумя слоями натрия, адсорбированными при $T = 300$ К. Резонансные пики выхода q атомов Na с порогами появления при энергиях электронов 57 и 75 eV могут быть приписаны энергиям ионизации уровней золота $5p_{3/2}$ и $5p_{1/2}$ [12]. Обращает внимание отсутствие непрерывного фона выхода атомов Na, возникающего от вторичных электронов, что свидетельствует о механизме возбуждения атомов Na

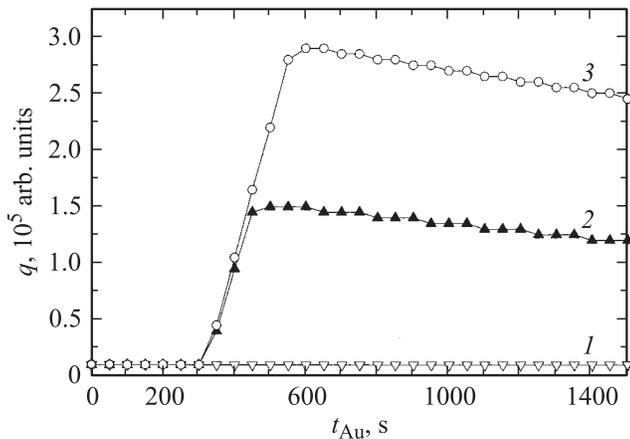


Рис. 1. Выход q атомов Na для трех концентраций натрия, напыленного на пленку золота при $T = 300$ К, в зависимости от времени напыления золота. $C_{\text{Na}}, 10^{15} \text{ at} \cdot \text{cm}^{-2}$: 1 — 0,8, 2 — 1,2, 3 — 1,6.

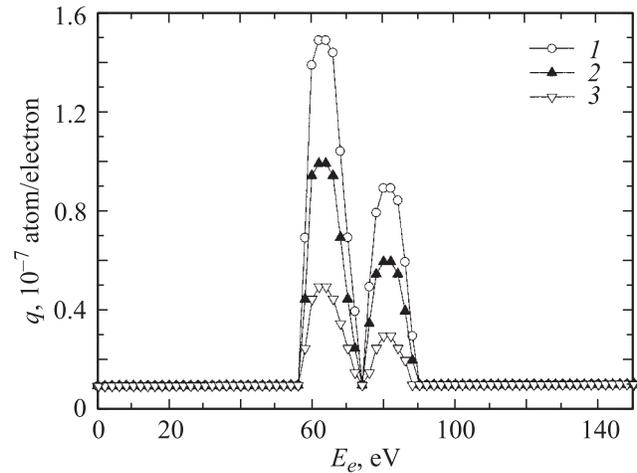


Рис. 2. Выход q атомов Na в зависимости от энергии бомбардирующих электронов E_e для двух слоев золота, нанесенных на вольфрам и покрытых двумя слоями натрия при $T = 300$ К. 1 — полный выход, 2 — выход в высокоэнергетическом пике, 3 — выход в низкоэнергетическом пике.

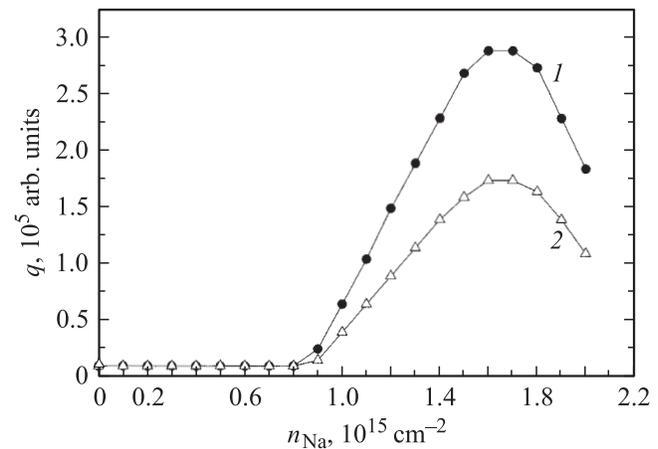


Рис. 3. Выход q атомов Na в зависимости от концентрации натрия, нанесенного на двухслойную пленку золота на вольфраме при $T = 300$ К, для двух энергий электронов. E_e, eV : 1 — 64, 2 — 82.

при ЭСД, аналогичном возбуждению атомов Eu и Sm из слоев, адсорбированных на окисленном вольфраме с образованием остовных экситонов [13].

Рис. 3 показывает выход q атомов Na при ЭСД от концентрации натрия, нанесенного на двухслойную пленку золота на вольфраме при $T = 300$ К. Порог появления выхода q атомов Na близок к образованию монослоя натрия, за которым выход атомов Na линейно возрастает с ростом адсорбированной концентрации натрия, достигая максимума при напылении примерно двух монослоев натрия. При дальнейшем росте концентрации натрия выход атомов Na уменьшается, по-видимому, в результате металлизации слоя натрия. Выход атомов Na увеличивается медленнее с ростом энергии бомбардирующих электронов, указывая на уменьшение сечения ионизации более глубоких уровней [14].

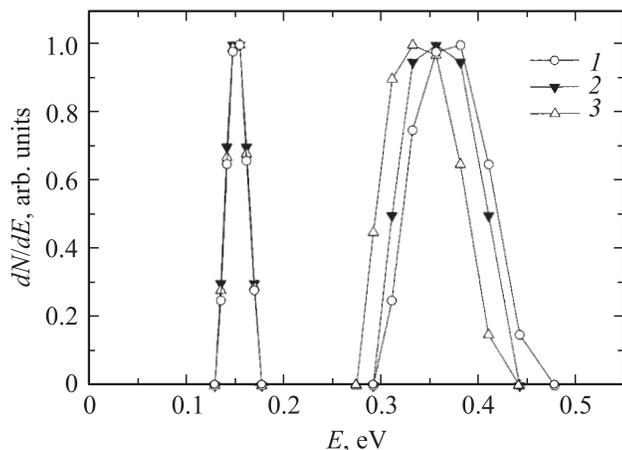


Рис. 4. Нормированные энергораспределения атомов Na при ЭСД для трех концентраций натрия, напыленного на пленку золота толщиной два монослоя при $T = 300$ К. $C_{\text{Na}}, 10^{15} \text{ at} \cdot \text{cm}^{-2}$: 1 — 1.0, 2 — 1.2, 3 — 1.6. Энергия электронов 64 eV.

На рис. 4 изображены нормированные энергораспределения атомов Na при ЭСД из пленки золота толщиной в два монослоя, на которую нанесено два монослоя натрия при $T = 300$ К. Энергораспределения состоят из двух колоколообразных кривых с максимумами при 0.15 и 0.35 eV, причем ширина пиков возрастает с увеличением энергии максимума от 0.05 до 0.15 eV. Форма и положение энергораспределений не зависят от энергии электронов, но с увеличением концентрации натрия максимум высокоэнергетического пика смещается в область низких энергий. Выход атомов Na, соответствующий высокоэнергетическому и низкоэнергетическому пикам энергораспределений, приведен на рис. 2 (кривые 2 и 3 соответственно).

4. Обсуждение результатов

Золото, нанесенное на вольфрам, химически связывается только с самым верхним слоем атомов вольфрама, и, следовательно, граница золото–вольфрам является атомно резкой. При покрытии меньше монослоя золото на W(100) растет эпитаксиально, а при больших концентрациях образуются разориентированные островки или кристаллиты с объемными свойствами [15,16]. При низких покрытиях работа выхода проходит через минимум при умеренном прогреве поверхности из-за проникновения золота под поверхностный слой, а при напылении нескольких монослоев увеличивается на 0.8 eV [15].

Напыление натрия на пленку золота, нанесенную на вольфрам, сопровождается понижением работы выхода и приводит к образованию трех фаз десорбции, которые приписываются формированию последовательного монослоя натрия, соединения NaAu и толстой пленки натрия [10].

Выход атомов Na при ЭСД коррелирует с образованием соединения NaAu, которое начинает образовываться

после заполнения монослоя натрия. Этот монослой обладает металлическими свойствами, и для его образования необходимо покрытие золота больше монослойного.

Выход атомов Na из соединения NaAu носит резонансный характер, причем пики выхода атомов Na появляются при энергиях электронов 57 и 75 eV, которые могут быть связаны с энергиями ионизации уровней Au $5p_{3/2}$ и Au $5p_{1/2}$ соответственно [12]. Резонансные пики можно связать с возникновением остоновых экситонов на золоте, которые разрушают связь между Au–Au или между Au–Na, вызывая антисвязанные состояния. Это согласуется с наличием двух пиков в энергораспределениях, имеющих различные энергетическое положение и ширину, причем высокоэнергетический пик смещается в область низких энергий с увеличением концентрации адсорбированного натрия, а положение низкоэнергетического пика не зависит от концентрации натрия. По-видимому, высокоэнергетический пик вызван ЭСД атомов Na, а низкоэнергетический пик — ЭСД молекул NaAu. Атомы Na и молекулы NaAu в детекторе поверхностной ионизации будут превращаться в ионы Na^+ .

Таким образом, выход ЭСД атомов Na подтверждает полупроводниковую природу соединения NaAu. Впервые обнаружен канал ЭСД атомов Na, связанный с возбуждением остоновых уровней золота.

Авторы выражают признательность В.И. Палееву и Н.Д. Потехиной за плодотворное обсуждение работы.

Список литературы

- [1] М.Е. Дриц, Л.Л. Зусман. Сплавы щелочных и щелочноземельных металлов. Металлургия, М. (1986). 248 с.
- [2] M. Skottke-Klein, A. Böttcher, R. Imbeck, S. Kennou, A. Morgante, G. Eftl. *Thin Solid Films* **203**, 131 (1991).
- [3] C. Holzhey, F. Brouers, J.R. Franz, W. Schirmacher. *J. Phys. F* **12**, 2601 (1982).
- [4] C. Koenig, N.F. Christensen, J. Kollar. *Phys. Rev. B* **29**, 6481 (1984).
- [5] R.E. Watson, M. Weinert. *Phys. Rev. B* **49**, 7148 (1994).
- [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] V.N. Ageev. *Prog. Surf. Sci.* **47**, 55 (1994).
- [9] М.В. Кнатько, М.Н. Лапушкин, В.И. Палеев. *ЖТФ* **75**, 109 (2005).
- [10] В.Н. Агеев, Е.Ю. Афанасьева. *ФТТ* **48**, 2217 (2006).
- [11] В.Н. Агеев, О.П. Бурмистрова, Ю.А. Кузнецов. *ФТТ* **29**, 1740 (1987).
- [12] Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Под ред. Д. Бриггса, М.П. Сиха. Мир, М. (1987). 567 с.
- [13] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Н.Д. Потехина. *ФТТ* **46**, 945 (2004).
- [14] Д. Вудраф, Т. Делчар. *Современные методы исследования поверхности*. Мир, М. (1989). 564 с.
- [15] E. Bauer, H. Poppe, G. Todd, P.R. Davis. *J. Appl. Phys.* **48**, 3773 (1977).
- [16] G.K. Wertheim, D.N. Buchanan, V. Lee. *Phys. Rev. B* **34**, 6869 (1986).