

## Возбуждение 2D плазмонов в системе Cs/W(110)

Г. В. Бенеманская, К. Е. Ровинский, Г. Э. Франк-Каменецкая\*

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

\* Санкт-Петербургский государственный технологический институт, 198013 Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 13 июня 2001 г.

Исследована эволюция спектров поверхностной фотоэмиссии для системы Cs/W(110) при метастабильных Cs покрытиях больших, чем монослой. Доказана возможность наблюдения 2D плазмонов методом пороговой фотоэмиссионной спектроскопии. Обнаружено три фотоэмиссионных пика, которые характеризуются сложным поведением в зависимости от дозы Cs адсорбции. Природа пиков может быть связана с фотоиндуцированным возбуждением плазмона в квази-2D Cs кластерах, поверхностного Cs плазмона и интерфейсного Cs-W плазмона.

PACS: 73.20.-г, 79.60.Dp

Интерес к исследованию коллективных электронных колебаний в тонких слоях щелочных металлов обусловлен тем, что данные объекты являются идеальной моделью для теоретического описания многочастичных эффектов в твердом теле. Тем не менее, задача экспериментального поиска и идентификации различных квази-двумерных (2D) коллективных мод далека от решения [1–6]. Кроме того, исследования металлических нанокластеров в последнее время приобрели особую актуальность в связи с созданием наноструктур и квантовых точек на поверхности полупроводников. Поэтому для понимания процессов формирования металлических ультратонких покрытий представляется важным определение природы плазменных мод, установление зависимости частот от толщины покрытий и от материала подложки.

Плазменные 2D колебания в системах с цезиевыми покрытиями наблюдались только для подложек Ag [1], Al [3], GaAs [7, 8] и Si [9]. В работах [1, 3] для Cs покрытий порядка десяти монослоев были найдены три особенности (2.0 эВ, 2.4 эВ, 2.9 эВ), которые приписывались поверхностному мультипольному, Cs поверхностному и Cs объемному плазмонам. Плазменные моды с другими частотами наблюдались при напылении цезия на поверхность полупроводников. Так, на поверхности Si(100)2x1 при Cs покрытии около 2 монослоев наблюдались особенности, которые были интерпретированы как интерфейсный Cs–Si плазмон (~ 1.0 эВ), Cs поверхностный плазмон (~ 2.2 эВ) и Cs объемный плазмон (~ 3.2 эВ) [9]. Для системы Cs/GaAs в спектрах характеристических потерь энергии электронов обнаружены пики, связанные, по мнению авторов, с плазменными колебаниями в Cs кластерах [7, 8]. Тем не менее,

данных исследований явно недостаточно для определения природы плазменных колебаний, для выяснения роли подложки и закономерностей формирования спектра 2D плазмонов. Изучение 2D плазмонов в цезиевых покрытиях на поверхности W не проводилось.

Основным методом исследования коллективных электронных возбуждений в металлах является метод характеристических потерь энергии электронов [2, 3, 7, 8]. Однако экспериментальные результаты, полученные данным методом, трудно поддаются интерпретации [4]. В последнее время появились две работы, в которых была использована ультрафиолетовая фотоэмиссионная спектроскопия [4, 5]. Показано, что она имеет значительные преимущества в интерпретации результатов и позволяет возбуждать поверхностные плазменные моды *p*-поляризованным излучением.

Нами предложен новый метод для исследования 2D плазмонов в тонких металлических покрытиях с использованием *p*-поляризованного возбуждения в области пороговой фотоэмиссии. Метод является развитием пороговой фотоэмиссионной спектроскопии, которая обладает более высокой поверхностной чувствительностью и энергетическим разрешением (< 0.02 эВ) при изучении поверхностных состояний по сравнению с традиционной ультрафиолетовой фотоэмиссионной спектроскопией. С помощью метода пороговой фотоэмиссионной спектроскопии изучены поверхностные состояния, индуцированные локальным взаимодействием атомов Cs с поверхностью металлов [10, 11] и полупроводников [12, 13].

В данной работе проведены детальные исследования спектров поверхностной фотоэмиссии для систе-

мы Cs/W(110) в различных адсорбционных режимах. Был использован так называемый динамический режим напыления, позволяющий изучать метастабильные Cs покрытия большие, чем монослой. С увеличением дозы адсорбированного Cs в спектрах обнаружено исчезновение зоны локального взаимодействия адатомов Cs с поверхностью W(110) и последовательное появление трех фотоэмиссионных пиков – 2.02 эВ, ~ 2.11 эВ, ~ 2.40 эВ. Модификация спектра свидетельствует о том, что природа данных пиков обусловлена возбуждением плазменных колебаний в квази-2D Cs кластерах, а также возбуждением интерфейсного Cs-W и поверхностного Cs плазмонов.

Эксперимент проводился *in situ* в условиях сверхвысокого вакуума  $P < 1 \cdot 10^{-10}$  торр при комнатной температуре. Атомарно-чистый цезий наносился на поверхность (110) W из стандартного источника. Интенсивность Cs потока определялась по методике [12, 13], что позволяло оценивать дозу цезия  $D_{Cs}$ , напыленную на образец за определенное время. Для исследования электронных свойств использовался метод пороговой фотоэмиссионной спектроскопии [10–13]. Фотоэмиссия возбуждалась *s*- и *p*-поляризованным светом, падающим на образец под углом  $45^\circ$ . Спектры поверхностной фотоэмиссии определялись как отношение  $I_p(h\nu)/I_s(h\nu)$ , где  $I_p(h\nu)$  и  $I_s(h\nu)$  – спектры фотоэмиссионных токов при возбуждении *p*- и *s*-поляризованным светом, соответственно. Фотоэмиссионные токи измерялись в диапазоне  $10^{-8}$ – $10^{-13}$  А. Погрешность в измерении спектров  $I_p/I_s$  не превышала 10%.

На рис.1 представлены спектры поверхностной фотоэмиссии в пошаговом режиме для  $\Theta = 0.8$  ML и в динамическом режиме для различных доз Cs, напыленных на поверхность W(110). Для Cs-покрытий на поверхности металла за один монослой (monolayer – ML)  $\Theta = 1$  ML принято покрытие  $\Theta = 5.5 \cdot 10^{14}$  атом/см<sup>2</sup> [14]. Пошаговый режим является общепринятым, при этом после напыления определенной дозы адсорбата источник выключается, а затем регистрируются спектры. Определение степени Cs-покрытия на поверхности W возможно только для  $\Theta < 0.95$  ML, когда коэффициент прилипания цезия равен единице. При покрытиях  $\Theta > 0.95$  ML коэффициент прилипания Cs резко падает (значение его при этом не определено) и поэтому получение больших покрытий требует использования особых режимов адсорбции, как правило, адсорбции при низких температурах [14]. Мы предложили использовать непрерывный, так называемый динамический, режим адсорбции, когда давление паров Cs в процессе напыления препятствует его десорб-

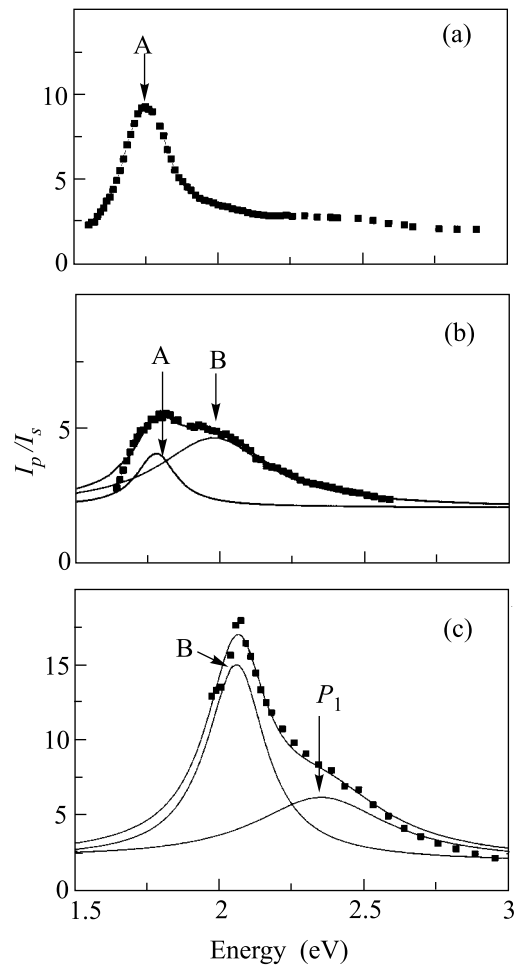


Рис.1. Спектры поверхностной фотоэмиссии  $I_p/I_s$  для различных доз Cs. Пошаговый режим адсорбции: а)  $4.2 \cdot 10^{14}$  атом/см<sup>2</sup> ( $\Theta = 0.8$  ML), динамический режим адсорбции: б)  $5.8 \cdot 10^{14}$  атом/см<sup>2</sup>; в)  $6.5 \cdot 10^{14}$  атом/см<sup>2</sup>

ции с поверхности. При этом регистрация спектров при дозах  $D_{Cs} > 5.5 \cdot 10^{14}$  атом/см<sup>2</sup> производится непосредственно в процессе напыления цезия. Длительность регистрации спектра дает погрешность в определении дозы ~ 10%.

В спектрах, представленных на рис.1, с ростом дозы Cs обнаружено появление трех фотоэмиссионных максимумов **A**, **B** и **P<sub>1</sub>** с энергиями 1.78 эВ, 2.02 эВ, и 2.35 эВ, соответственно. Пик **A** (рис.1a), наблюдаемый только в пошаговом режиме, соответствует фотоэмиссии из поверхностной Cs-зоны, которая изучена ранее в [10]. Данный пик обусловлен локальным взаимодействием адатомов Cs с поверхностью вольфрама. Интенсивность пика резко падает с увеличением дозы, и он исчезает из спектра (рис.1b,c). Модификация пика **A** сопровождается появлением в спектре нового широкого ( $\Delta E \sim 0.3$  эВ) пика **B** (рис.1b),

который является доминирующим в спектре вплоть до  $D_{Cs} \approx 6.5 \cdot 10^{14}$  атом/см<sup>2</sup> (рис.1с). Энергетическое положение пика не изменяется от дозы. Дальнейшее увеличение дозы приводит к исчезновению пика **B** (рис.2b). Такое поведение позволяет предположить, что природа пика **B** связана с возбуждением плаз-

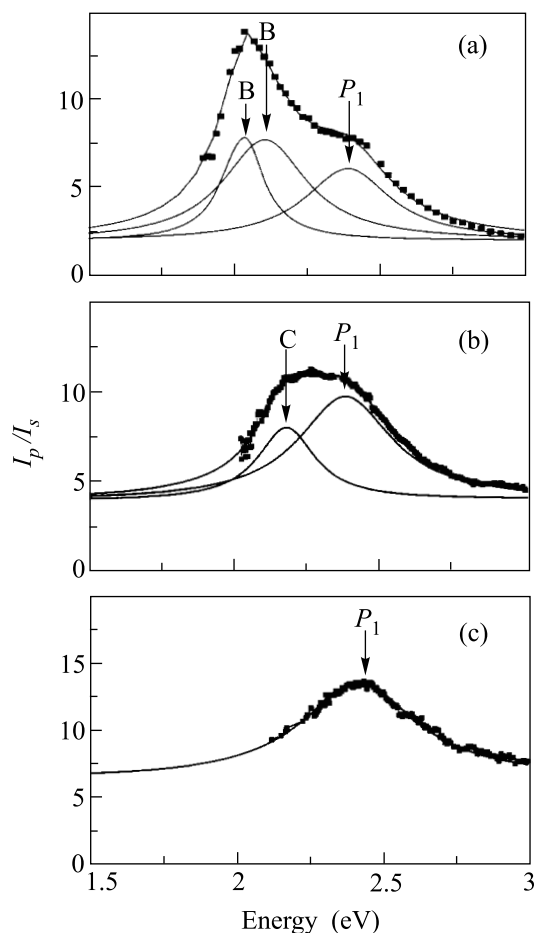


Рис.2. Спектры поверхностной фотоэмиссии  $I_p/I_s$  для различных доз Cs. Динамический режим адсорбции: а)  $8.0 \cdot 10^{14}$  атом/см<sup>2</sup>; б)  $1.1 \cdot 10^{15}$  атом/см<sup>2</sup>; в)  $1.3 \cdot 10^{15}$  атом/см<sup>2</sup>

менных колебаний в двумерных цезиевых кластерах. В пользу данной трактовки свидетельствует то обстоятельство, что пик **B** появляется в спектре приблизительно при тех покрытиях, при которых резко уменьшает свою интенсивность, а затем и пропадает, пик **A**. Таким образом, возникновение пика **B** может быть обусловлено объединением в плотноупакованные 2D-кластеры отдельных адатомов Cs, которые при меньших покрытиях локально взаимодействовали с поверхностью W(110). Причина образования кластеров заключается в том, что при определенном Cs покрытии диполь-дипольное отталкивание поляризованных адатомов Cs вследствие эффекта

деполяризации сменяется притяжением. Постоянное энергетическое положение и возрастание интенсивности пика **B** в некотором диапазоне доз свидетельствует об увеличении площади, занятой Cs кластерами, и о практически постоянной плотности атомов Cs в кластерах. При покрытии, несколько большем, чем монослой, взаимодействие между кластерами становится сравнимым с взаимодействием адатомов внутри кластера, что приводит к разрушению Cs кластеров и формированию сплошного покрытия.

Для выяснения природы пика **P<sub>1</sub>** следует рассмотреть эволюцию спектров, представленных на рис.1 и рис.2. Пик **P<sub>1</sub>** появляется при  $D_{Cs} = 6.5 \cdot 10^{14}$  атом/см<sup>2</sup> и имеет незначительную интенсивность вплоть до дозы  $D_{Cs} = (9 \div 10) \cdot 10^{14}$  атом/см<sup>2</sup>, которая является критической и вызывает его скачкообразный рост (рис.2b). Далее интенсивность пика остается практически неизменной (рис.2b,c). Отметим, что в отличие от пика **B**, энергетическое положение пика **P<sub>1</sub>** непостоянно. С увеличением дозы наблюдается сдвиг в сторону больших энергий от 2.35 эВ до 2.44 эВ, что связано, очевидно, с увеличением электронной плотности в Cs покрытии. Наблюдаемые значения близки к полученным ранее энергиям для Cs поверхностного плазмона на Si и Al подложках при Cs покрытиях больших, чем 2 ML [1, 3, 9]. Таким образом, на энергию поверхностного Cs плазмона оказывает влияние как природа подложки, так и концентрация адатомов. Важным в поведении пика Cs плазмона представляется скачкообразный рост его интенсивности при той дозе, которая соответствует исчезновению Cs кластеров. По-видимому, данное явление связано с формированием сплошного цезиевого покрытия. Существование поверхностного Cs плазмона при меньших дозах, когда еще наблюдаются Cs кластеры, может быть связано с эффектом протекания.

Пик **C** обнаружен в достаточно узком диапазоне доз  $D_{Cs} = (8 \div 1.3) \cdot 10^{14}$  атом/см<sup>2</sup> (рис.2a,b). Видно, что для пика **C** наблюдается энергетический сдвиг, аналогичный сдвигу пика Cs плазмона, что свидетельствует об увеличении электронной плотности. Можно увидеть некоторую корреляцию между параметрами и поведением пика **C** и пика **P<sub>1</sub>** поверхностного Cs плазмона. Мы полагаем, что природа пика **C** связана с узлом электронной плотности на границе раздела подложки с Cs покрытием, то есть с возбуждением интерфейсного Cs-W плазмона. Исчезновение пика **C** при больших дозах, возможно, обусловлено тем, что метастабильное Cs покрытие  $2 \div 3$  ML экранирует возбуждение плазмона на границе раздела Cs-W.

Таким образом, обнаружено, что процесс адсорбции Cs до образования сплошного Cs покрытия проходит через стадию образования Cs кластеров определенного размера. Установлено, что профиль электронной плотности системы Cs/W имеет по крайней мере два узла большой амплитуды, достаточной для возбуждения поверхностного Cs плазмона и интерфейсного Cs-W плазмона. На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что пороговая фотоэмиссионная спектроскопия является эффективным методом для изучения 2D плазменных мод.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований # 01-02-16802 и гранта # 1-107 в рамках программы Министерства промышленности, науки и технологий РФ.

1. A. Liebsch, G. Hincelin, T. Lopez-Rios, Phys. Rev. **B41**, 10463 (1990).
2. K.-D. Tsuei, E. W. Plummer, A. Liebsch et al., Phys. Rev. Lett. **64**, 44 (1990).
3. K.-D. Tsuei, E. W. Plummer et al., Surf. Sci. **247**, 302 (1991).
4. S. R. Barman, K. Horn, P. Haberle et al., Phys. Rev. **B57**, 6662 (1998).
5. D. Claesson, S.-A. Lindgren, L. Wallden et al., Phys. Rev. **B82**, 1740 (1999).
6. A. Liebsch, *Electronic Excitations at Metal Surfaces*, Plenum, New York, 1997.
7. U. del Pennino, R. Compano, B. Salvarani et al., Surf. Sci. **409**, 258 (1998).
8. О. Е. Терещенко, А. Н. Литвинов и др., Письма в ЖЭТФ **70**, 537 (1999).
9. Y.-C. Chao, L. S. O. Iohansson, and R. I. G. Uhrberg, Phys. Rev. **B56**, 15446 (1997).
10. Г. В. Бенеманская, М. Н. Лапушкин, Письма в ЖЭТФ **45**, 423 (1987).
11. A. Liebsch, G. V. Benemanskaya, and M. N. Lapushkin, Surf. Sci. **302**, 303 (1994).
12. G. V. Benemanskaya, D. V. Dianeka, and G. E. Frank-Kamenetskaya, Surf. Rev. Lett. **5**, 91 (1998).
13. Г. В. Бенеманская, В. П. Евтихийев, Г. Э. Франк-Каменецкая, ФТТ **42**, 356 (2000).
14. A. G. Fedorus and A. G. Naumovets, Surf. Sci. **21**, 426 (1970).