

## СПЕКТРЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТОЭМИССИИ СИСТЕМЫ W(110) - Ва

*Г.В.Бенеманская, М.Н.Лапушкин*

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

Поступила в редакцию 4 августа 1993 г.

После переработки 20 сентября 1993 г.

Впервые исследован энергетический спектр поверхностных состояний в системе Ва - W(110) по спектрам пороговой фотоэмиссии при *s*- и *p*-поляризациях возбуждающего света. Вблизи уровня Ферми обнаружено два поверхностных состояния, индуцированных субмонослойной пленкой Ва.

При формировании границы раздела металлическая подложка – пленка перераспределение электронной плотности в области связи происходит главным образом за счет валентных электронов адатомов и поверхностных состояний подложки. Поэтому основные изменения в энергетическом спектре поверхностных состояний, такие как сдвиг и исчезновение собственных поверхностных состояний подложки и появление новых состояний, индуцированных пленкой, следует ожидать вблизи уровня Ферми ( $E_F$ ). Действительно, эксперименты на металлических монокристаллах с субмонослойными покрытиями щелочных металлов [1-3] показали для каждого из адсорбатов образование одного индуцированного поверхностного состояния с энергией связи в пределах  $0,1 \div 0,3$  эВ.

Для поиска и изучения поверхностных состояний вблизи  $E_F$  в работе [2] предложен метод оптической спектроскопии порогового фотоэмиссионного тока, который обладает гораздо большей чувствительностью при регистрации поверхностных состояний, чем традиционные методы фотоэмиссионной спектроскопии при высокоэнергетическом рентгеновском и ультрафиолетовом возбуждении. Особенностью нового метода является возможность спектрального выделения фотоэмиссии с поверхностных состояний, которая может превосходить фотоэмиссию из объема более чем на порядок.

В настоящей работе впервые исследованы спектры поверхностной фотоэмиссии системы W(110) – Ва в широком диапазоне субмонослойных покрытий  $\theta$  (монослой  $\theta = 1$ ). Обнаружена сложная структура спектра поверхностных состояний вблизи уровня Ферми, включающая одно собственное поверхностное состояние подложки и два поверхностных состояния, индуцированных бариевым покрытием.

Эксперимент проводился в условиях сверхвысокого вакуума  $P \sim 1 \cdot 10^{-10}$  торр. На очищенную поверхность монокристалла W(110) наносился атомарно-чистый Ва различной поверхностной концентрации. Степень покрытия изменялась в пределах  $0,2 \leq \theta \leq 1,0$ . Условия подготовки поверхности образца и определения степени субмонослойного покрытия Ва описаны ранее [4]. Поляризованный монохроматический свет ( $\Delta\lambda = 4$  нм) падал на кристалл под углом  $\gamma = 45^\circ$ . Регистрировались спектральные зависимости интегрального порогового фотоэмиссионного тока  $I_s(\lambda)$  и  $I_p(\lambda)$  соответственно при *s*- и *p*-поляризациях возбуждающего света по методике [2].

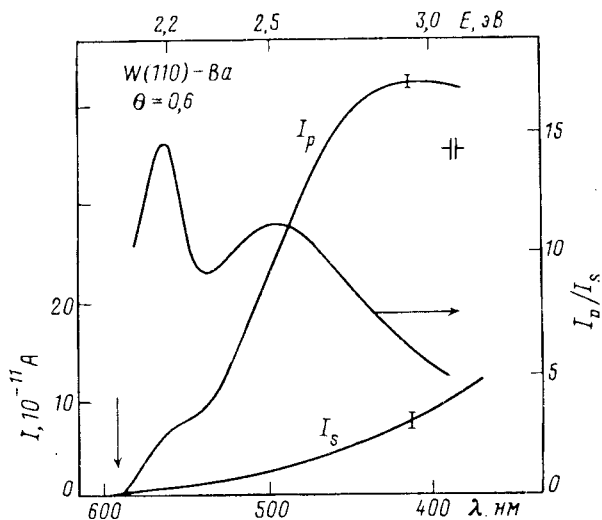


Рис.1. Спектры фотоэмиссионного тока  $I_s(\lambda)$  и  $I_p(\lambda)$  при возбуждении соответственно  $s$ - и  $p$ -поляризованным светом и спектр поверхностной фотоэмиссии  $I_p/I_s$  системы W(110) - Ва для субмонослойного покрытия  $\theta = 0,6$ . Стрелкой указано значение красной границы фотоэффекта

На рис.1 для субмонослойного покрытия  $\theta = 0,60$  приведены экспериментальные спектры  $I_s(\lambda)$  и  $I_p(\lambda)$ , стрелкой указано значение красной границы фотоэффекта которое, для металлов соответствует положению уровня Ферми. Фотоэмиссия  $I_s(h\nu)$  с хорошей точностью описывается классическим законом Фаулера  $I \sim (h\nu - \phi)^2$  [5], где  $\phi$  - работа выхода ( $\phi = E_F - E_{vac}$ , причем  $E_{vac} = 0$  и ось положительных энергий направлена в сторону валентной зоны), и связана с возбуждением объемных электронных состояний в периодическом потенциале решетки. В случае  $p$ -поляризации спектр  $I_p(h\nu)$  представляет суперпозицию объемной и поверхностной фотоэмиссии, природа которой связана с возбуждением электронных поверхностных состояний нормальной компонентой электрического вектора  $p$ -света [2]. Как показано в [2], совместное исследование  $I_p(h\nu)$  и  $I_s(h\nu)$  позволяет определить спектральную зависимость поверхностной фотоэмиссии, которая равна отношению  $I_p/I_s$ . В случае покрытия  $\theta = 0,60$  спектр поверхностной фотоэмиссии имеет два максимума при  $h\nu_{max} = 2,17$  эВ и  $h\nu_{max} = 2,50$  эВ. Теоретические расчеты показывают, что положение максимума в спектре  $I_p/I_s$  с хорошей точностью ( $\sim 0,03$  эВ) совпадает с энергетическим положением (относительно уровня вакуума) максимума локальной плотности состояний в поверхностной зоне. Следовательно, легко определить значение энергии связи поверхностной зоны:  $E = h\nu_{max} - E_F$ . Для данного покрытия Ва имеется две поверхностных зоны, энергия связи которых составляет  $E_B = 0,09$  эВ и  $E_C = 0,42$  эВ.

Изучение спектра поверхностной фотоэмиссии системы W(110) - Ва в широком диапазоне субмонослойных покрытий позволяет выявить различные стадии формирования и модификации поверхностных зон. На рис.2 видно, что при малых покрытиях ( $\theta < 0,40$ ) наблюдается максимум А, который отвечает фотоэмиссии с собственных поверхностных состояний W(110). Его поведение при увеличении  $\theta$  хорошо коррелирует с данными работы [2] по увеличению энергии связи собственного поверхностного состояния W(110) при адсорбции Cs. Рост поверхностной концентрации Ва приводит к появлению непосредственно около  $E_F$  максимума В. Диапазон существования этого поверхностного состояния  $0,30 < \theta < 0,65$ . При  $\theta > 0,65$  поверхностная зона В пересекает

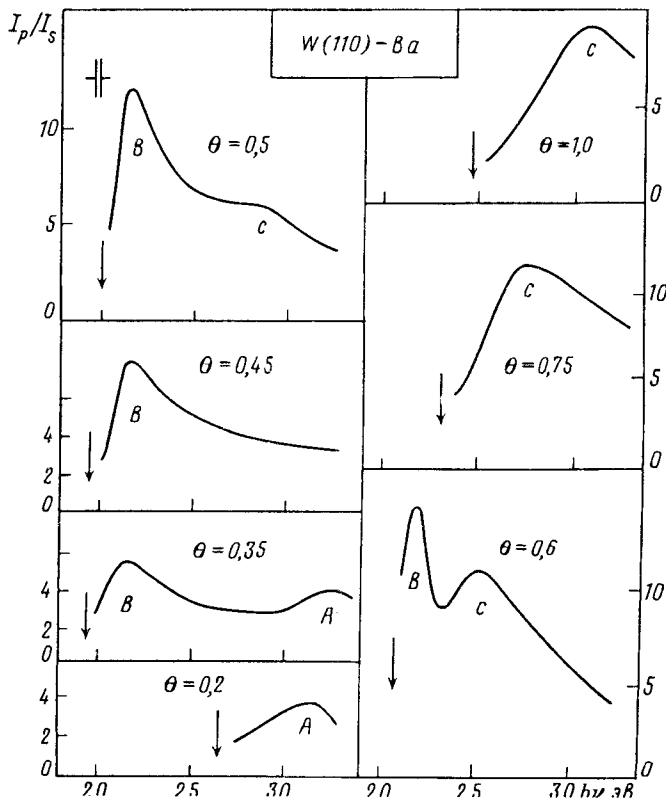


Рис.2. Спектры поверхностной фотоэмиссии  $I_p/I_s$  системы  $W(110) - Ba$  для различных субмонослойных покрытий  $Ba$ . Стрелками указаны значения работы выхода  $\phi$

уровень Ферми и становится не активной в фотоэмиссии. Наиболее интересна ситуация в диапазоне покрытий  $0,50 \leq \theta \leq 0,65$ , когда в спектре поверхностной фотоэмиссии одновременно наблюдается два максимума –  $B$  и  $C$ , которым соответствуют две индуцированные поверхностные зоны. При дальнейшем увеличении бариевого покрытия ( $\theta' > 0,70$ ), в спектре поверхностной фотоэмиссии остается одна поверхностная зона, энергия связи которой увеличивается до значения  $E_C = 0,75$  эВ при монослойном покрытии.

Таким образом, полученные результаты показывают сложную эволюцию спектра поверхностных состояний, происходящую в диапазоне субмонослойных бариевых покрытий, и свидетельствуют об участии ряда возбужденных электронных  $s - p - d$ -состояний атомов  $Ba$  в процессе формирования границы раздела. Модификация спектра поверхностной фотоэмиссии указывает на сильные изменения локальной плотности поверхностных состояний по мере роста бариевой пленки. В частности, непосредственно вблизи уровня Ферми наблюдается резкое увеличение локальной плотности поверхностных состояний при  $\theta = 0,60$  и такое же резкое уменьшение при бариевых покрытиях близких к монослою.

Для субмонослойных покрытий  $Ba$  впервые зарегистрирована двухзонная структура индуцированных поверхностных состояний. Аналогичные исследования с адсорбцией щелочных металлов [1-3] показывают, что вблизи  $E_F$  при субмонослойных покрытиях образуется только одна заполненная поверхностная зона. Расчеты локальной плотности электронных состояний системы

W(110) – Ва для  $\theta = 0,4 \div 0,8$  [4], монослоя Ва на W(100) [6] и изолированного монослоя Ва [7] указывают на наличие также одного максимума плотности  $ds$ -гибридизированных состояний. Определена энергия связи этой зоны  $E \sim 0,8$  эВ, что хорошо соответствует полученному нами результату для зоны  $C$  ( $\theta = 1$ ). Теория пологовой фотоэмиссии с учетом поверхностной зоны показывает, что форма максимума поверхностной фотоэмиссии  $I_p/I_s$ , особенно вид высокоэнергетического спада, содержит информацию о характере гибридизации поверхностных состояний [2]. Поскольку форма максимума  $C$  в спектре (рис.2) изменяется с покрытием незначительно, то можно предполагать сохранение  $ds$ -характера гибридизации этой зоны во всем диапазоне субмонослойных покрытий, где она наблюдается. Качественное отличие высокоэнергетических спадов для максимумов  $B$  и  $C$  в экспериментальных спектрах (рис.2) свидетельствует о различном характере гибридизации соответствующих зон. Исходя из электронной структуры адсорбированных атомов бария для зоны  $B$  наиболее вероятен  $dp$ -характер гибридизации.

- 
1. Physics and chemistry of alkali metal adsorption, Eds. H.P.Bonzel, A.M.Bradshaw, G.Ertl. Amsterdam: Elsevier, 1989.
  2. Г.В.Бенеманская, М.Н.Лапушкин, М.И.Урбах, ЖЭТФ **102**, 1664 (1992).
  3. G.M.Watson, P.A.Bruhwieler, E.W.Plummer et al., Phys. Rev. Lett. **65**, 468 (1990).
  4. Г.В.Бенеманская, О.П.Бурмистрова, М.Н.Лапушкин, ФГТ **29**, 1646 (1987).
  5. R.H.Fowler, Phys. Rev. **38**, 35 (1931).
  6. L.A.Hemstrem and S.R.Chubb, Phys. Rev. **B47**, 10748 (1993).
  7. E.Wimmer, J. Phys. F. **14**, 681 (1984).