

$$(\tilde{u}_3^{sc})_T = \frac{u_0 \rho_0 \tilde{u}}{2|k_0| \omega_2^2} [-\Delta \tilde{\mu} k_0^2 \cos^2 \theta \sin \theta \sin \varphi \cos \varphi - \Delta \tilde{\rho} \omega_2^2 k_0^2 \cos \theta \sin \theta \cos \varphi],$$

где  $(\tilde{u}_1^{sc})_L$ ,  $(\tilde{u}_2^{sc})_L$ ,  $(\tilde{u}_3^{sc})_L$ ,  $(\tilde{u}_1^{sc})_T$ ,  $(\tilde{u}_2^{sc})_T$ ,  $(\tilde{u}_3^{sc})_T$  — компоненты измеренных векторов соответственно продольной и поперечной составляющих рассеянного поля в некотором направлении, определяемом углами  $\theta$  и  $\varphi$  (см. рис. 1),  $k_0 = \omega_1/c_p = \omega_2/c_s$ ,  $u$  — амплитуда падающего поля (для простоты считаем, что амплитуды облучающих продольной и поперечных плоских волн равны). Аргументы при  $\Delta \tilde{\mu}$ ,  $\Delta \tilde{\rho}$  — вида  $k_0 \cos \theta \sin \varphi - k_0$ ,  $k_0 \cos \theta \cos \varphi$ ,  $k_0 \sin \theta$ , т. е. для каждой пары значений  $\theta$  и  $\varphi$  система уравнений (17) определяет значения фурье-образов функций, описывающих неоднородность среды, в точке, лежащей на сфере Эвальда  $k^2 = k_0^2$ . Решив систему уравнений (17) для всех значений  $\theta$  и  $\varphi$ , мы получим значения фурье-образов функций  $\Delta \tilde{\mu}$ ,  $\Delta \tilde{\rho}$  на всей сфере Эвальда, соответствующей данным частотам  $\omega_1$  и  $\omega_2$  и данному направлению падения облучающих плоских продольной и поперечной волн. (Система уравнений (17) соответствует падающим плоским продольной и поперечной волнам, распространяющимся вдоль оси  $Ox$ .) Информацию о полном фурье-образе функций  $\Delta \tilde{\mu}$ ,  $\Delta \tilde{\rho}$  можно получить путем сканирования как по частоте, так и по направлению распространения облучающих плоских волн (или комбинируя эти два вида сканирования). Восстановить значения функций  $\Delta \tilde{\mu}(x)$ ,  $\Delta \tilde{\rho}(x)$ ,  $\Delta \tilde{\rho}(x)$  можно, сделав обратное преобразование Фурье функций  $\Delta \tilde{\mu}(k)$ ,  $\Delta \tilde{\rho}(k)$ ,  $\Delta \tilde{\rho}(k)$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Yih-Hsing Pao, Vasundara Varatharajulu. // J. Acoust. Soc. Am. 1976. 59, N 6. P. 1361—1371. [2] Kaveh M. Soumekh M., Mueller R.K. // Acoustical Imaging, Plenum Press. N. Y., 1982. V. 11. P. 325—335. [3] Adams M.H., Anderson A. P. // Acoustical Imaging, Plenum Press. N. Y., 1982. V. 10. P. 365—380. [4] Devaney A. J. // Ultrasonic Imaging, Academic Press. N. Y., 1982. V. 4. P. 336—350. [5] Bojarski N. N. // Acoustical Imaging, Plenum Press. N. Y., 1982. V. 11. P. 399—408. [6] Richardson J. M. // Ultrasonic Symposium Proc. New Orleans, 1979. N. Y., 1979. P. 356—360.

Поступила в редакцию  
16.10.85

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1986. Т. 27, № 6

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 539.211

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-СТИМУЛИРОВАННОЙ ДЕСОРБЦИИ НЕЙТРАЛЬНЫХ МОЛЕКУЛ С ПОВЕРХНОСТИ ЗОЛОТА И ПАЛЛАДИЯ

Г. Г. Федоров

(кафедра общей физики для химического факультета)

При исследовании электронно-стимулированной десорбции (ЭСД) молекул  $CO$  и  $CO_2$  с поверхности окислов никеля, меди и алюминия в области энергий бомбардирующих электронов  $U = 13$  эВ нами были обнаружены [1] максимумы ЭСД, которые связаны с окислением молекул окиси углерода при возбуждении бомбардирующими электронами молекул кислорода, находящийся на поверхности окисла. При наличии атомов хрома [2] на поверхности никеля приводит к исчез-

новению указанного максимума ЭСД, т. е. возникновение ЭСД зависит не только от возбуждения молекул кислорода и окиси углерода, но и от природы окисного слоя.

Представлялось интересным исследовать ЭСД с поверхности золота и палладия по следующим причинам. Золото является металлом, поверхность которого устойчива на воздухе при комнатной температуре, в то время как поверхности других металлов в большей или меньшей степени проявляют тенденцию к образованию окислов [3]. Поэтому при ЭСД с поверхности золота отсутствует влияние окисного слоя. Выбор поверхности палладия для исследования ЭСД был связан с тем, что на его поверхности молекулы кислорода адсорбируются при комнатной температуре достаточно хорошо (степень покрытия поверхности палладия адсорбированными молекулами кислорода составляет 0,3 [4]). Отметим, что на поверхности золота при комнатной температуре молекулы кислорода практически не адсорбируются (степень покрытия поверхности золота молекулами кислорода составляет менее  $2 \cdot 10^{-4}$  [4]). В связи с этим исследование ЭСД с поверхности золота и палладия позволило уяснить роль адсорбированного кислорода в процессе образования углекислого газа при ЭСД.

Применяющаяся методика исследования ЭСД нейтральных молекул была описана ранее [1]. В настоящих опытах она отличалась тем, что вместо полусферических использовались полуцилиндрические аноды из золота и палладия с ренийевым катодом, проходившим по оси цилиндра. Поверхности образцов промывались перед опытом в спирте, а затем в бидистиллированной воде и выдерживались десять суток на воздухе.

**Результаты опытов и их обсуждение.** На рис. 1 представлена зависимость вероятности ЭСД нейтральных молекул ( $W$ ) от энергии бомбардирующих электронов ( $U$ ) с поверхностей золота (кривая 1) и палладия (кривая 2). Измерение энергии бомбардирующих электронов  $U$  проводилось с точностью  $\pm 0,4$  эВ, а вероятности ЭСД  $W$  — с точностью  $\pm 5\%$ . Эти кривые показывают, что вероятность ЭСД как с поверхности золота, так и с поверхности палладия резко возрастает в области 10—15 эВ, однако максимума вероятности ЭСД (который наблюдался [1] для окисных поверхностей никеля, меди и алюминия) с поверхностей золота и палладия не обнаружено. Кривые 1 и 2 показывают также, что вероятность ЭСД с поверхности золота и палладия практически одинакова (отличается не более чем на 10%). Этот результат, принимая во внимание указанное выше различие адсорбционных способностей поверхностей золота и палладия по отношению к кислороду, явился неожиданным, так как при ЭСД выделялся в основном продукт окисления окиси углерода ( $\text{CO}_2$ ). В связи с этим нами были проведены опыты по количественному определению десорбировавшихся молекул с поверхности золота. Для этого поверхность золота была облучена потоком электронов с энергией 30 эВ. Повторно измеренная (после облучения) вероятность ЭСД с поверхности золота представлена кривой 3. Вероятность ЭСД с поверхности палладия (повторно измеренная для контроля стабильности условий опыта) представлена кривой 2. Здесь кружочками обозначены экспериментальные точки ЭСД, определенные до облучения золота, а крестиками — после облучения.

Проведенные измерения показывают, что после облучения ЭСД с поверхности палладия не изменилась, в то время как вероятность ЭСД с поверхности золота уменьшилась вдвое за счет облучения. При этом облучении с поверхности золота десорбция составляла  $(5 \pm 0,5) \times$

$\times 10^{15}$  мол./см, что соответствует десяткам монослоев (десорбция была определена экспериментально по скорости откачки ячейки). Отметим, что при расчете десорбции с единицы поверхности коэффициент шероховатости поверхности не учитывался.

На рис. 2 представлены результаты масс-спектрометрических исследований ЭСД с поверхностей золота и палладия в зависимости от энергии бомбардирующих электронов. Количество десорбированных молекул ( $A$ ) при ЭСД представлено здесь в относительных единицах

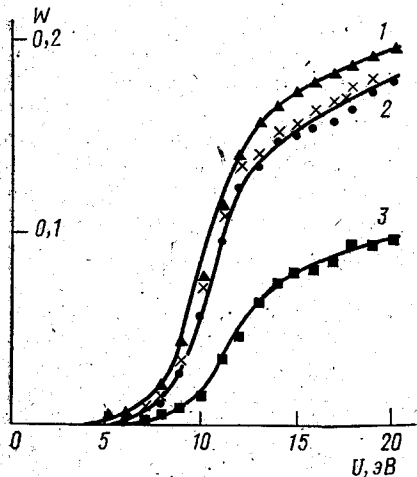


Рис. 1

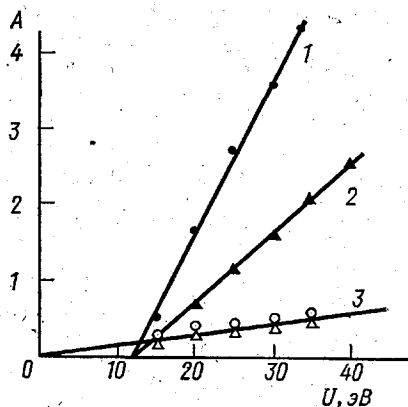


Рис. 2

ионного тока масс-спектрометра. Прямая 1 рис. 2 отражает ЭСД молекул  $\text{CO}_2$  с поверхности палладия, а прямая 2 — аналогичную зависимость с поверхности золота после облучения. Эти прямые, пересекаясь в области 13 эВ, показывают, что ЭСД молекул  $\text{CO}_2$  начинается при энергии бомбардирующих электронов  $U=13$  эВ и линейно возрастает с увеличением  $U$ . Прямая 3 рис. 2 отражает зависимость ЭСД молекул окиси углерода, которая протекает идентично как с поверхности золота (обозначена треугольниками), так и с поверхности палладия (кружочки). Кроме того, из этой зависимости видно, что уже в области малых энергий возможна ЭСД молекул окиси углерода. По-видимому, здесь мы имеем дело со слабой обратимой формой адсорбции молекул окиси углерода. Как было показано ранее [5], окись углерода всегда присутствует на поверхностях, находившихся в контакте с воздухом. Возникновение же  $\text{CO}_2$  на поверхности обычно связано с окислением окиси углерода [1, 4, 6].

Известно [6], что процесс окисления  $\text{CO}$  на поверхности может протекать двумя способами: 1) когда адсорбированная молекула  $\text{CO}$  реагирует с адсорбированной молекулой кислорода и 2) когда реакция протекает между молекулами окиси углерода  $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$ . В наших опытах первый способ окисления  $\text{CO}$  маловероятен. Действительно, на поверхности золота концентрация адсорбированных молекул кислорода в несколько тысяч раз меньше концентрации адсорбированных молекул кислорода на палладии, а величины ЭСД молекул  $\text{CO}_2$ , как показывают прямые 1 и 2 рис. 2, являются величинами одного порядка. Это говорит о том, что скорость реакции окисления в наших

опытах не зависела от концентрации адсорбированного кислорода на поверхности.

Окисление CO вторым способом протекает на катализаторах при температурах выше  $300^{\circ}\text{C}$  [6] при энергиях активации 5—15 ккал/моль. В наших условиях окисление CO при комнатной температуре по второму пути могло быть активировано бомбардирующими электронами. В пользу этого говорит и тот факт, что десорбция  $\text{CO}_2$  начиналась только тогда, когда энергия бомбардирующих электронов становилась достаточной для диссоциации и ионизации молекул углекислого газа, адсорбированных на поверхности.

Однако следует отметить, что не исключен и другой, третий путь образования  $\text{CO}_2$  при ЭСД, связанный с разложением молекул адсорбированной воды под действием бомбардирующих электронов. Молекулы воды не десорбируются при ЭСД. Это было проверено нами для ряда поверхностей и для электронов с энергией вплоть до 300 эВ. При больших энергиях бомбардирующих электронов начинался термический нагрев поверхности и возникала термодесорбция. Интересно отметить, что адсорбированные молекулы воды десорбировались и уверенно регистрировались при нагреве поверхности всего на  $5^{\circ}\text{C}$  и не десорбировались под действием бомбардирующих электронов даже с энергией в 300 эВ. Не исключено, что в наших опытах складывалась ситуация, аналогичная с фотолизом, когда под действием квантов света десорбция молекул воды не происходит [7], а фоторазложение воды и выделение кислорода с поверхности полупроводника идут [8]. Однако вопрос о разложении адсорбированной воды под действием бомбардирующих электронов с малой энергией и ее роли как поставщика кислорода в процессах окисления требует тщательной экспериментальной проверки, которая проводится нами в настоящее время.

Сравнивая результаты настоящих опытов с полученными ранее [1, 2], можно заключить, что химические реакции между адсорбированными молекулами под действием бомбардирующих электронов протекают различным образом для одних и тех же молекул, адсорбированных на различных поверхностях. С нашей точки зрения это говорит о том, что бомбардирующий электрон взаимодействует не с адсорбированной молекулой, а с адсорбционным комплексом, который может быть различным для одной и той же молекулы, адсорбированной на различных поверхностях.

Автор благодарен В. Ф. Киселеву за обсуждение работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Федоров Г. Г. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3, Физ. Астрон. 1984. 25, № 4. С. 19—22. [2] Федоров Г. Г., Васильев В. Ф. // Там же. № 6. С. 72—74.  
[3] Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. М., 1965.  
[4] Eley D. D., Moore P. V. // Surf. Sci. 1981. 111. P. 325—343. [5] Федоров Г. Г. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1982. 23, № 1. С. 60—63. [6] Андреев А., Шопов Д. // Химическая связь при адсорбции и катализе. София, 1979. Т. 2. С. 192—200. [7] Лихтман Д. // Новое в исследовании поверхности твердого тела. М., 1977. Вып. 2. С. 104—135. [8] Фомин Г. В. и др. // ДАН СССР. 1973. 212, № 2. С. 424—427.

Поступила в редакцию  
03.06.85