

ПОСЛЕСТОЛКНОВИТЕЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ 4d-ВАКАНСИИ ЗОЛОТА БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

*В.М.Микушкин, А.В.Захаревич, И.И.Павлецов, С.Е.Сысоев,
В.В.Шнитов, М.Ю.Кучиев, С.А.Шейнерман*

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

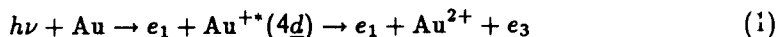
Поступила в редакцию 25 октября 1993 г.

Выполнено сравнительное исследование энергетических спектров оже-электронов, испускаемых при возбуждении 4d-вакансии золота рентгеновскими квантами и быстрыми электронами. При электронном ударе обнаружено изменение кинетической энергии оже-электрона, обусловленное взаимодействием после столкновения (ВПС) этого электрона с электроном, выбитым из внутренней оболочки. Предложены теоретическая модель и формулы, описывающие ВПС, как на изолированных атомах (газ), так и на металлической поверхности. Расчетное ВПС-изменение энергии оже-электрона (0,6эВ) соизмеримо с экспериментальным (0,25±0,15эВ). Сделан вывод о том, что в отличие от изолированного атома классический эффект ВПС Баркера-Берри на металлической поверхности отсутствует.

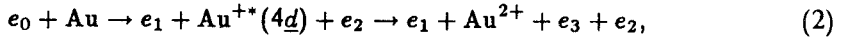
Корректное описание процессов эмиссии и рассеяния электронов веществом невозможно без учета эффекта кулоновского взаимодействия после столкновения (ВПС), приводящего к перераспределению энергий эмиттированных и рассеянных частиц [1]. Подавляющее большинство работ на эту тему посвящено исследованию разновидностей классического ВПС-эффекта Баркера-Берри [2] на изолированном атоме (атоме в газовой фазе). Этот эффект проявляется на пороге неупругих процессов, когда скорость рассеянной частицы и сечение неупругого процесса малы. Сравнительно недавно начал изучаться анизотропный эффект ВПС, значительный в нетрадиционной области больших абсолютных, но малых относительных скоростей рассеянных и эмиттированных частиц [1, 3]. Анизотропный ВПС-эффект, в отличие от классического, велик в области скоростей, которая характеризуется сечениями, близкими к максимальным. Поэтому он может представлять большой практический интерес. Вместе с тем, указанный эффект экспериментально остается малоизученным. Почти ничего не известно о роли ВПС в твердом теле и на его поверхности.

Целью настоящей работы был поиск и исследование эффекта ВПС на поверхности твердого тела при рассеянии быстрых электронов. Предполагалось, что роль анизотропного эффекта ВПС в этом случае может быть особенно большой.

Исследования проведены на электронном спектрометре "LHS-11" ("Leybold AG") в условиях высокого вакуума (10^{-7} Па). Атомно-чистая поверхность золотого образца приготавливалась ионным травлением. В счетном режиме измерялись спектры оже-электронов (e_3), испускаемых перпендикулярно поверхности образца в результате возбуждения 4d-вакансии атомов золота (энергия связи $I_{4d} = 336$ эВ) под действием рентгеновских квантов ($h\nu = 1486,6$ эВ):



и быстрых электронов (e_0) с энергией $E_0 = 3000$ эВ:



где e_1 - рассеянный электрон или фотоэлектрон, e_2 - выбитый электрон (рис.1а).

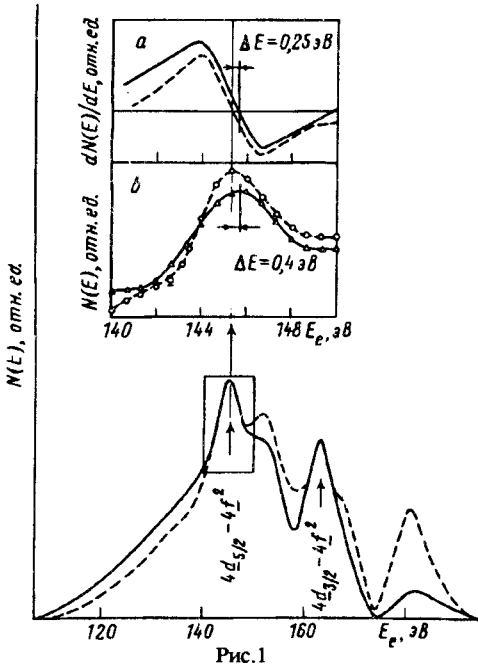


Рис.1

Рис.1. Энергетические $N - NN$ -спектры оже-электронов, испускаемых при облучении поверхности золота AlK_{α} -рентгеновскими квантами (сплошная кривая) и при рассеянии на этой поверхности быстрых ($E_0 = 3000$ эВ) электронов (штриховая кривая). На вставках приведены спектры, измеренные в отдельных экспериментах: а - дифференциальный спектр $dN(E)/dE$, б - истинный спектр $N(E)$

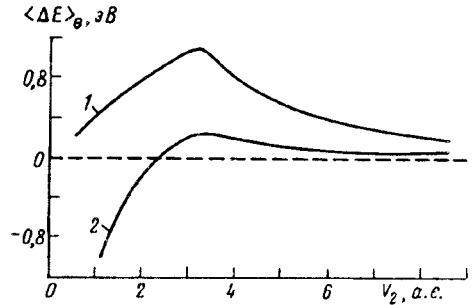


Рис.2

Рис.2. Зависимость ВПС-сдвига оже-линии, усредненного по углу θ вылета выбитого e_2 -электрона, от скорости v_2 этого электрона

Энергия фотонов в (1) была выбрана достаточно большой, чтобы пренебречь взаимодействием фотоэлектрона (e_1) с продуктами распада $4d$ -вакансии. Поэтому кинетическая энергия оже-электрона в (1) не возмущается ВПС-эффектом, и соответствующая линия в спектре электронов была использована в качестве реперной для исследования ВПС в процессе (2). При этом искомое изменение кинетической энергии оже-электрона в (2) равно разности в положении оже-линий для процессов (1) и (2).

На рис.1 для обоих процессов приведены экспериментальные энергетические спектры оже-электронов, испускаемых в результате очень быстрых супер-переходов Костера-Кронига: $4d_{5/2,3/2} - 4f^2$. Непрерывная составляющая (подложка) из спектров вычтена. (С погрешностью процедуры вычитания подложки связано различие низкоэнергетических частей спектров для процессов фотоионизации и рассеяния электронов. Резкое увеличение высокоэнергетического пика во втором процессе может быть связано с возрастанием вероятности встряски валентного электрона в квазистационарное состояние, образованное

в квазинепрерывном спектре центробежным барьером, и последующим оже-распадом с участием этого электрона). Наблюдаемые в спектрах оже-пики характеризуются большой шириной, поскольку формируются несколькими неразрешаемыми из-за большой естественной ширины термами. Поэтому для обнаружения относительно небольшого (заинтегрированного по углам и энергиям) ВПС-сдвига проводилось детальное исследование одного из пиков: $4d_{5/2} - 4f^2$. Эксперимент повторялся несколько раз в режимах измерения как истинного спектра $N(E)$ (рис.1б), так и дифференциального $dN(E)/dE$ (рис.1а). Несмотря на значительные погрешности, искомый эффект наблюдался в каждом эксперименте. Сравнение спектров оже-линий для процессов (2) и (1) позволило определить экспериментальное значение ВПС-сдвига для процесса (2), которое оказалось равным $\Delta E_{exp} = 0,25 \pm 0,15$ эВ. (Результаты одного из первых экспериментов приведены в работе [4]).

Энергия ударяющего электрона в (2) также была выбрана достаточно большой для того, чтобы пренебречь взаимодействием рассеянного электрона (e_1) с продуктами распада $4d$ -вакансии. Поэтому ВПС связано в (2) с наличием выбитого (e_2) электрона. Для изолированного атома Au (в газовой фазе) ВПС-сдвиг может быть описан уравнением, полученным в эйкональном приближении [1]:

$$\Delta E_a^2 = \xi_a \cdot \Gamma/2 = (-v_2^{-1} + v_{2,3}^{-1}) \cdot \Gamma/2, \quad (3)$$

где v_2 – скорость выбитого электрона e_2 , $v_{2,3}$ – относительная скорость выбитого и оже-электронов, $\Gamma = 5,5$ эВ – естественная ширина $4d$ -уровня, определенная в настоящей работе по линии спектра фотоэлектронов (e_1 , процесс (1)).

Первый член в (3) ответственен за классический сдвиг Баркера–Берри [2], который существует в припороговой области энергий столкновений.

Процесс (2) характеризуется непрерывным распределением скорости выбитого электрона v_2 , которое было получено в настоящей работе из данных работы [5]. На рис.2 для изолированного атома золота приведена усредненная по углу вылета зависимость ВПС-сдвига от скорости выбитого электрона (кривая 2). Видно, что в области малых скоростей v_2 ВПС определяется первым (классическим) членом выражения (3). Однако после усреднения по v_2 классический ВПС-сдвиг существенно уменьшается из-за непосредственного взаимодействия выбитого и оже-электронов, которое описывается вторым членом выражения (3).

Главная особенность настоящей работы заключается в том, что исследуемый атом золота входит в состав твердого тела. Выбитый (e_2) и оже-электроны эмитируются металлической поверхностью. Поэтому помимо взаимодействия частиц e_2 , e_3 , Au^{2+} , необходимо учитывать вклад в ВПС этих частиц с металлической поверхностью. Это взаимодействие может быть эффективно учтено введением зарядов изображения. ВПС-сдвиг оже-линии может быть описан в рамках данной модели следующей формулой:

$$\Delta E_a^2 = \xi_a^2 \cdot \Gamma/2 = 2(v_{2,3}^{-1} - v_{2+,3}^{-1}) \cdot \Gamma/2, \quad (4)$$

где $v_{2+,3}^{-1}$ – относительная скорость оже-электрона e_3 и индуцированного заряда e_2^+ .

Из формулы (4) следует важный вывод: на поверхности металла классический эффект Баркера–Берри отсутствует. Причина этой особенности заключается в экранировке вакансий электронами металла.

Зависимость усредненного по углу ВПС-сдвига (4) для металлической поверхности золота приведена на рис.2 (кривая 1). Усреднение по энергетическому распределению выбитых электронов e_2 дает расчетное значение ВПС-сдвига $\Delta E_{theor} = 0,60$ эВ, которое сравнимо с экспериментальным.

Работа частично поддерживается грантом фонда Сороса, присужденного Американским Физическим Обществом.

-
1. М.Ю.Кучиев, С.А.Шейнерман, УФН **158**, 353 (1989).
 2. R.V.Barker and H.W.Berry, Phys. Rev. **151**, 14 (1966).
 3. В.М.Микушкин, X Всесоюзн. конф. по физике электронных и атомных столкновений, Ужгород, 1988 г. Тезисы докладов, **1**, с.117.
 4. В.М.Микушкин, И.И.Павлецов, С.Е.Сысоев и др., XXI Всесоюзн. конф. по эмиссионной электронике, Ленинград, 1990 г. Тезисы докладов, **2**, с.131.
 5. J.J.Yen and Lindau, Atom. Data and Nucl. Data Tables **32**, 1 (1985).