

13

Выход электронно-стимулированной десорбции и глубина проникновения возбуждающих электронов

© Ю.А. Кузнецов, М.Н. Лапушкин

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

E-mail: kuznets@ms.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 19 марта 2017 г.

Исследованы концентрационные зависимости электронно-стимулированной десорбции (ЭСД) атомов Cs и Na при адсорбции на неметаллических покрытиях, выращенных на W-подложке. Обнаружено, что процессы ЭСД происходят в интерфейсе адсорбированный слой–неметаллическая подложка. Показано, что спад в концентрационной зависимости выхода ЭСД, наблюдающийся после достижения монослойного покрытия, связан с уменьшением количества возбуждающих ЭСД электронов, достигающих интерфейса.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.14.44827.16777

В настоящей работе проведено исследование поверхности методом электронно-стимулированной десорбции (ЭСД) [1]. Облучение поверхности твердого тела электронами с энергией больше порогового значения может вызывать десорбцию атомов и ионов с поверхности. ЭСД атомов и ионов происходит из диэлектрических образцов и полупроводников с адсорбированными на них металлическими пленками. Ранее было показано, что наличие ЭСД в адсорбционной системе служит прямым доказательством неметаллической природы такой системы [1].

ЭСД ранее успешно использовалась при исследовании адсорбции щелочных металлов (ЩМ) на различных металлических и полупроводниковых подложках, что позволило предложить модель ЭСД нейтральных частиц на основе оже-стимулированной десорбции и на ее основе интерпретировать полученные результаты по ЭСД атомов щелочных, щелочноземельных и редкоземельных металлов (РЗМ) с подложек различной природы [2–6]. В дальнейшем данная модель была модернизирована и детально проработана, а ее ключевым элементом стало наличие локального состояния вблизи дна зоны проводимости [7,8].

ЭСД атомов ЩМ и РЗМ как метод исследования адсорбционных систем и тонких пленок обладает высокой чувствительностью и к электронной структуре, и к адсорбционным состояниям исследуемых систем [2–8].

ЭСД атомов характеризуется величиной выхода ЭСД q , равной отношению плотности десорбирующегося потока атомов к плотности потока электронов, возбуждающих ЭСД. Однако до сих пор не было уделено должного внимания влиянию толщины пленки адсорбата на выход ЭСД атомов и ионов. Глубина проникновения электронов, возбуждающих процесс ЭСД, очевидно, связана с длиной свободного пробега электронов в твердом теле. Данному вопросу посвящен ряд работ, как экспериментальных, так и теоретических, например [9,10]. Длина свободного пробега электронов в твердом теле λ зависит от их кинетической энергии E_e . Зависимость $\lambda(E_e)$ имеет минимум в диапазоне $E_e = 30\text{--}60$ eV и индивидуальна для каждого материала.

Целью настоящей работы является выяснить влияние глубины проникновения возбуждающих процесс ЭСД электронов на выход ЭСД атомов.

Для количества электронов N с энергией E_e , проникших на глубину d , можно записать следующую формулу:

$$N(d) = N_0 \exp(-d/(\lambda \cos \gamma)),$$

где N_0 — число падающих электронов на поверхность, γ — угол падения электронов на поверхность относительно нормали к ней.

При ЭСД облучение электронами обычно производят в диапазоне 0–300 eV, но стоит отметить, что максимальный выход ЭСД на практике достигается при энергиях 20–100 eV.

Рассмотрим, как влияет толщина металлической пленки, адсорбированной на поверхности полупроводника, на выход ЭСД. Будем считать, что:

- 1) величина λ остается неизменной для всех покрытий адсорбата, а возбуждение процесса ЭСД происходит по нормали к поверхности ($\gamma = 0$);
- 2) в процессе ЭСД принимает участие только ближайший к поверхности полупроводника слой металлического адсорбата;
- 3) вероятность возбуждения процесса ЭСД p прямо пропорциональна покрытию вплоть до 1 монослоя (1 ML) и при больших покрытиях

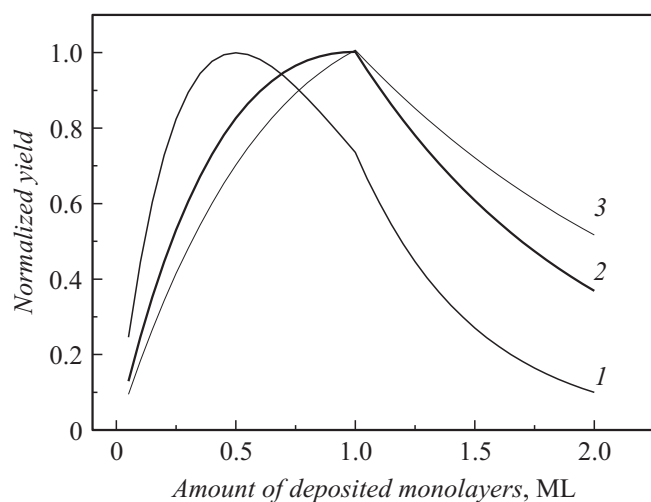


Рис. 1. Выход ЭСД q в зависимости от толщины пленки адсорбата для трех значений длины свободного пробега λ , ML: 1 — 0.5, 2 — 1.0, 3 — $\lambda = 1.3$.

остается неизменной. При этом второй слой адсорбата не принимает участия в процессе ЭСД;

4) выход ЭСД можно записать в виде $q = kN(d)p$, где k — коэффициент пропорциональности.

На рис. 1 приведены расчеты в рамках простой модели выхода ЭСД q в зависимости от толщины металлической пленки на поверхности полупроводникового адсорбата для трех значений λ (0.5, 1.0 и 1.3 ML). Величина λ рассчитывалась в рамках модели TRP-2M [10]. Видно, что в рамках простой модели зависимость q от покрытия имеет максимум. Возрастание q связано с увеличением количества адсорбата вовлеченных в процесс ЭСД, а спад связан с процессом неупругих столкновений электронов, возбуждающих процесс ЭСД, в пленке адсорбата. Если $\lambda < 1$ ML, то максимум зависимости выхода ЭСД будет наблюдаться при покрытиях меньших 1 ML, а если $\lambda > 1$ ML, то максимум зависимости выхода ЭСД будет наблюдаться при покрытии 1 ML. Напыление же второго монослоя адсорбата приводит к резкому уменьшению выхода ЭСД.

Предлагаемые в настоящей работе исследования были проведены в сверхвысоковакуумной установке „Спектрометр ЭСД“. Прибор и методика измерений детально описаны ранее [7].

В качестве подложки исследуемых образцов использовались текстурованные W(100)-ленты, очищавшиеся прогревом при 1800 К в атмосфере кислорода при давлении $1 \cdot 10^{-6}$ Torr в течение 3 h. Монослой кислорода наносился на ленту экспозицией в атмосфере кислорода при давлении $1 \cdot 10^{-6}$ Torr при 1600 К в течение 300 s. Золото, цезий и натрий напылялись на ленту из соответствующих прямонакальных испарителей. Температура образца могла изменяться в диапазоне от 160 до 600 К. Исследуемые образцы облучались пучком электронов с энергией в диапазоне 0–300 eV. Десорбирующиеся при этом атомы ионизировались на ленте поверхностной ионизации, а получаемый ионный сигнал усиливался с помощью электронного умножителя. Давление остаточных газов в установке не превышало $5 \cdot 10^{-10}$ Torr.

Установка „Спектрометр ЭСД“ позволяет регистрировать выход ЭСД атомов ЩМ с рекордной чувствительностью, измерять зависимость этого выхода ЭСД от энергии возбуждающих электронов, от количеств адсорбата и адсорбента, нанесенных на подложку, от температуры подложки, а также определять кинетическую энергию десорбирующихся атомов (по времени их пролета от образца до ионизатора) и ее энергораспределение.

На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость выхода ЭСД атомов Cs от энергии возбуждающих электронов E_e , где хорошо видна квазирезонансная зависимость $q(E_e)$ для системы Cs/CsAu/Au/W. Детально процессы, приводящие к формированию пика $q(E_e)$, рассмотрены в [7,8]. На рис. 3 представлены зависимости выхода q атомов ЩМ при ЭСД с вольфрама, покрытого двумя монослоями золота, от количества напыленного ЩМ при энергии возбуждения электронов 64 eV, в максимуме квазирезонансного пика $q(E_e)$. Необходимость напыления двух монослоев Au связана с особенностями формирования полупроводникового интерметаллида ЩМ–золото [11]. Так, ближайший к W-подложке монослой Au не принимает участия в формировании интерметаллида, в его образовании принимают участие верхние слои Au. При напылении первого монослоя атомов ЩМ на Au образуется слой адсорбированных атомов ЩМ. Дальнейшее же напыление атомов ЩМ приводит к формированию полупроводникового интерметаллида ЩМ–золото [11–13] и появлению ЭСД атомов ЩМ.

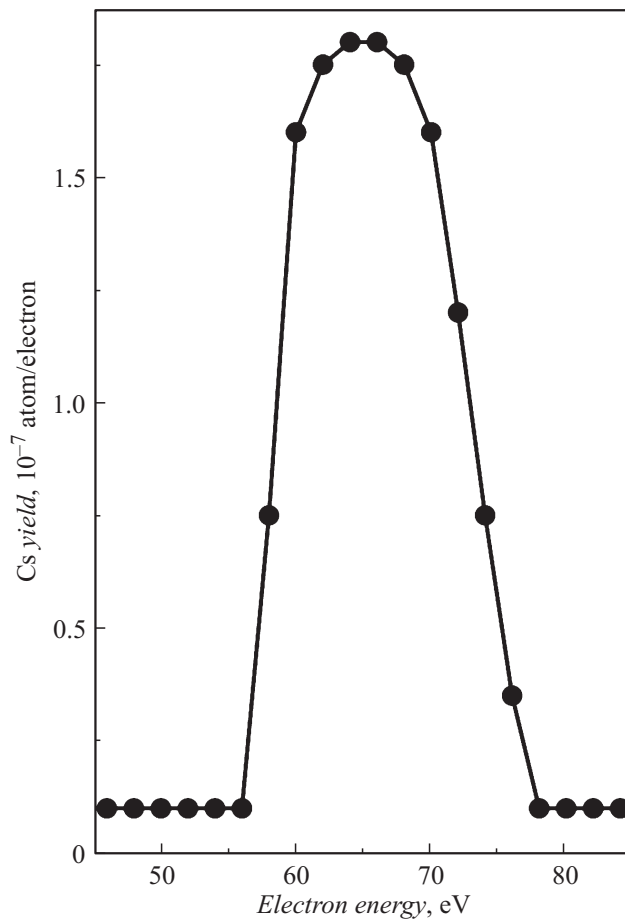


Рис. 2. Выход ЭСД q атомов Cs при ЭСД с вольфрама, покрытого при 300 К двумя монослоями золота и двумя монослоями цезия, для $T = 160$ К в зависимости от энергии бомбардирующих электронов E_e .

Наблюдается практически линейный рост выхода ЭСД с увеличением покрытия атомов ЩМ. После достижения максимума при напылении двух монослоев ЩМ выход ЭСД уменьшается. При этом выход ЭСД

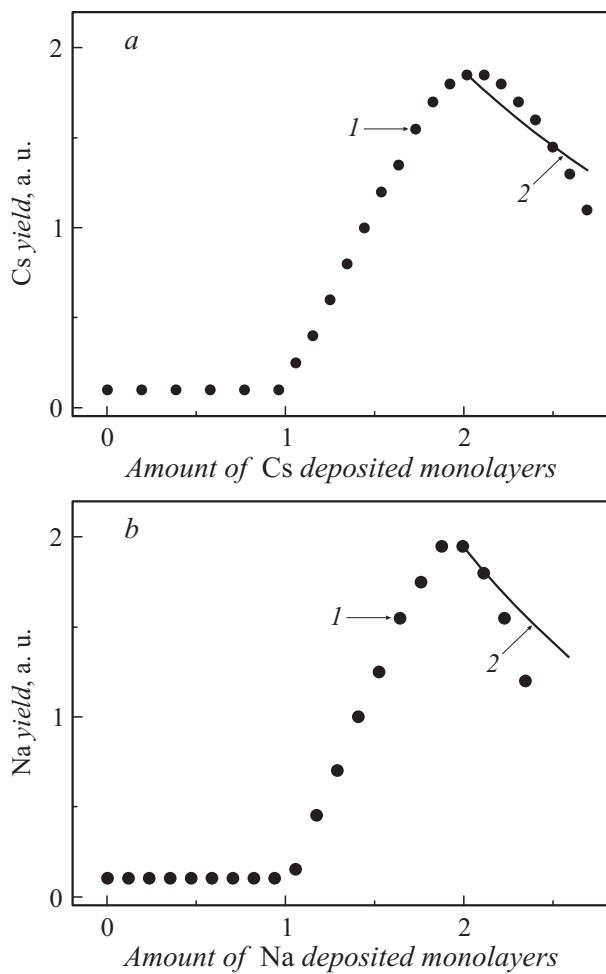


Рис. 3. Экспериментальные (1) и рассчитанные (2) значения выхода атомов Cs (a) и Na (b) при ЭСД с вольфрама, покрытого при 300 К двумя монослоями Au, для 160 К в зависимости от количества напыленного ЦМ. Энергия электронов 64 eV.

не зависит от толщины соединения ЩМ–золото [14], что указывает на участие в ЭСД атомов ЩМ на сформированной полупроводниковой пленке интерметаллида ЩМ–золото, либо из ближайшего к интерметаллиду слоя ЩМ, т. е. процесс возбуждения ЭСД происходит в интерфейсе металл–полупроводник [8]. Диффузия же десорбирующихся атомов ЩМ сквозь верхний монослой ЩМ маловероятна, так как такой процесс возможен только при наличии существенного количества дефектов в верхнем монослое ЩМ.

Оценим величину уменьшения выхода ЭСД с учетом того, что с увеличением толщины адсорбированного слоя ЩМ количество электронов, возбуждающих процесс ЭСД, происходящий в интерфейсе полупроводник–металл, уменьшается за счет неупругого рассеяния в адслое ЩМ. Будем считать, что толщина одного монослоя ЩМ равна диаметру атома ЩМ, т. е. для цезия толщина 1 ML равна 0.53 nm, а для натрия толщина монослоя будет равна 0.38 nm. Также делаются те же предположения, что и ранее при расчете теоретического выхода ЭСД при напылении металлической пленки на поверхность полупроводника. Отметим, что в этом расчете формирование полупроводника происходит только при напылении второго монослоя ЩМ, когда на его поверхности уже есть 1 ML ЩМ. Поэтому в этом случае ЭСД появляется после напыления одного монослоя ЩМ, а не сразу, как на рис. 1. Вероятность возбуждения процесса ЭСД в диапазоне доз напыления ЩМ от 1 до 2 ML прямо пропорциональна количеству сформированного интерметаллида, а при больших дозах напыления ЩМ (> 2 ML) остается неизменной.

Глубина проникновения $\lambda = 1.03$ nm в слое Cs рассчитана в рамках модели TRP-2M [10], так как экспериментальных значений λ для данных энергий электронов найти не удалось. Расчет проводился только для доз напыления больших двух монослоев, когда толщина адсорбированных пленок ЩМ увеличивается. Получено хорошее согласие экспериментальных и рассчитанных значений (рис. 3, *a*).

Аналогичный расчет был сделан и для адсорбции Na (глубина проникновения $\lambda = 0.60$ nm), который приведен на рис. 3, *b*. Экспериментальные и рассчитанные значения совпадают хуже, чем в случае адсорбции Cs. Наблюдаемые расхождения между экспериментальными и рассчитанными значениями могут быть связаны как с заниженными значениями λ , которые получаются в рамках модели TRP-2M [10], так

и, возможно, с уменьшением вероятности возбуждения процесса ЭСД в интерфейсе Na/NaAu.

Исследованы концентрационные зависимости выхода ЭСД атомов Cs и Na на различных подложках CsAu и NaAu, и показано, что эти зависимости отражают особенности формирования Cs/CsAu и Na/NaAu на Au/W. Процессы ЭСД происходят в интерфейсе адсорбированный слой–неметаллическая подложка. Продемонстрирована роль глубины проникновения возбуждающих процесс ЭСД электронов. Наблюдаемые расхождения между экспериментальными и рассчитанными кривыми могут быть связаны с влиянием процессов изменения взаимодействия в интерфейсе адсорбированный слой–неметаллическая подложка, которые приводят к изменению электронной структуры в интерфейсе, что в свою очередь ведет к уменьшению вероятности процесса ЭСД, либо с уменьшением прозрачности второго слоя для выхода атомов, участвующих в процессе ЭСД.

Список литературы

- [1] Ageev V.N. // Progr. Surf. Sci. 1994. V. 47. P. 55.
- [2] Ageev V.N., Kuznetsov Yu.A., Potekhina N.D. // J. Phys.: Condens Matter. 2010. V. 22. P. 084005.
- [3] Ageev V.N., Кузнецов Ю.А., Потехина Н.Д. // ЖТФ. 2013. Т. 83. С. 85.
- [4] Ageev V.N., Kuznetsov Yu.A., Potekhina N.D. // Surf. Sci. 1996. V. 367. P. 113.
- [5] Ageev V.N., Kuznetsov Yu.A. // Phys. Low-Dim. Struct. 1999. N 1/2. P. 113.
- [6] Ageev V.N., Kuznetsov Yu.A., Madey T.E. // Surf. Sci. 2006. V. 600. P. 2163.
- [7] Кузнецов Ю.А., Лапушкин М.Н. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2015. В. 7. С. 333.
- [8] Кузнецов Ю.А., Лапушкин М.Н., Потехина Н.Д. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 12. С. 14.
- [9] Lindau I., Spicer W.E. // J. Electr. Spectr. Relat. Phen. 1974. V. 3. P. 409.
- [10] Tanami S., Powell C.J., Penn D.R. // Surf. Interf. Anal. 2015. V. 47. P. 871.
- [11] Ageev V.N., Афанасьева Е.Ю. // ФТТ. 2006. Т. 48. С. 2217.
- [12] Barth J.V., Behm R.J., Ertl G. // Surf. Sci. 1995. V. 341. P. 62.
- [13] Кнатько М.В., Лапушкин М.Н., Палеев В.И. // ЖТФ. 1998. Т. 68. С. 108.
- [14] Ageev V.N., Кузнецов Ю.А., Потехина Н.Д. // ФТТ. 2010. Т. 52. С. 1828.