

Таким образом, с помощью локальных измерений концентрации показано, что если время пролета газа от источника до диска Маха порядка длительности работы источника, то ярко проявляется суперпозиция двух нестационарных процессов, связанных с процессом образования факела в затопленном пространстве и с переменным давлением в самом источнике.

Список литературы

- [1] *Белавин В.А., Голуб В.В., Набоко И.М.* // ПМТФ. 1979. № 1. С. 56–65.
- [2] *Cline M.C., Wilmoth R.G.* // AIAA Paper. 1984. N 84-0464. 16 p.
- [3] *Булгакова Н.М., Кузнецов Л.И.* // ПМТФ. 1992. № 67. С. 12–22, 28–32. 1993. № 1. С. 65–69.
- [4] *Жаркова Н.Г., Кузнецов Л.И., Ребров А.К., Ярыгин В.Н.* // ТВТ. 1976. Т. 14. № 1. С. 17–20.
- [5] *Петров Ю.И.* Кластеры и малые частицы. М.: Наука, 1986. 366 с.
- [6] *Головей А.Д.* Автореф. канд. дис. Кемерово, 1992. 24 с.
- [7] *Воронель Е.С., Кирушин Л.П., Кузнецов Л.И.* // Сибирский физико-техн. журн. 1991. № 2. С. 75–79.
- [8] *Войтенко В.А., Кузнецов Л.И.* // ПТЭ. 1992. № 4. С. 189–191.
- [9] *Kuznetsov L.I.* // SPIE. 1991. Vol. 1440. P. 222–228.
- [10] *Минько Л.Я.* // Физика и применение плазменных ускорителей. Минск: Наука и техника, 1974. С. 142–181.
- [11] *Ковингтон, Лью, Линкольн.* // Ракетная техника и космонавтика. 1977. Т. 15. № 8. С. 148–155.
- [12] *Ashkenas H., Sherman F.S.* // Rarefied Gas Dynamics (4th Symp.). New York: Academic Press, 1966. Vol. 2. P. 84–105.
- [13] *Волчков В.В., Иванов А.И., Кисляков Н.И.* и др. // ПМТФ. 1973. № 2. С. 64–73.
- [14] *Кузнецов Л.И., Ребров А.К., Ярыгин В.Н.* // ПМТФ. 1975. № 3. С. 83–87.

02;11;12

Журнал технической физики, т. 64, в. 12, 1994

© 1994 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ВТОРИЧНО-ЭЛЕКТРОННОЙ И ВТОРИЧНО-ИОННОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РАБОТЫ ВЫХОДА ПУТЕМ АДсорбЦИИ

А.А.Дорожкин, С.Г.Ершов, А.В.Филимонов, Н.Н.Петров

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251, Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 31 марта 1994 г.)

Величина электронной работы выхода является фундаментальным понятием физики твердого тела. Поэтому знания о природе этой величины и умение корректно измерить ее принципиально важно не только для теоретических представлений, но и для практических приложений при создании новых материалов. Существует целый комплекс методов измерения $e\Phi$ (термоэмиссионный, Томпсона–Зисмана и т.д.), где для зондирования поверхности используют самые различные воздействия. При этом комплексное применение методов (например, термоэлектронные, поверхностной ионизации) позволяет не только получить более

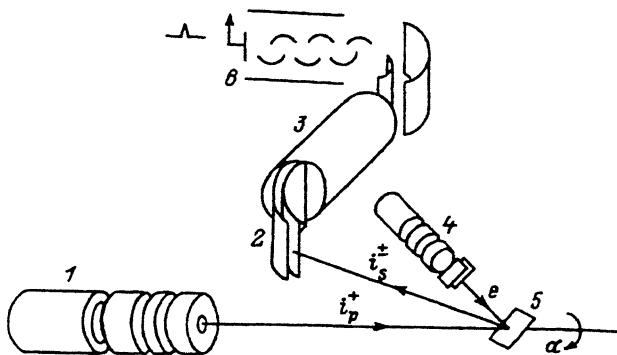


Рис. 1. Основные узлы экспериментальной установки.
 1 — ионная пушка, 2 — энергоанализатор вторичных ионов, 3 — масс-анализатор, 4 — электронная пушка, 5 — образец, 6 — электронный умножитель.

точные значения $e\Phi$, но и расширить характер получаемой информации (потенциальный рельеф, области с различной $e\Phi$).

Для проведения измерений нами были использованы электроны, положительные и отрицательные ионы в форме метода Андерсона [1]. Исследовалось влияние изменения работы выхода $\Delta e\Phi$ при адсорбции остаточных газов на энергетические спектры вторичных электронов N^e , отрицательных вторичных ионов N^- и положительных вторичных ионов N^+ .

Эксперименты были выполнены на оборудовании фирмы "Balzers", включающем квадрупольный масс-спектрометр (модель QMG-511) со 127° -ным энергоанализатором вторичных частиц, при давлении остаточных газов $5 \cdot 10^8$ Тор. Образцы GaAs (100) с концентрацией электронов $1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ очищались бомбардировкой поверхности ионами Kr^+ с энергией 2 кэВ и плотностью тока $10^{-6} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ (эти же ионы использовались в качестве первичных I_p^+). В состав N^+ и N^- входили все ионы с массами атомов > 20 а.е. Относительное расположение основных узлов экспериментальной установки представлено на рис. 1.

Сведения о величине $e\Phi$ мы получали, исследуя изменения контактной разности потенциалов (КРП) между образцом и электродами энергоанализатора. Для этого мы применяли линейную экстраполяцию низкоэнергетических участков N^e , N^+ , N^- к нулевым значениям кинетической энергии вторичных частиц (рис. 2), что позволило получать значения величин ΔN^e , ΔN^+ , ΔN^- , которые соответствуют $\Delta e\Phi$. Естественно, эта операция имеет определенную погрешность и не позволяет определить точное значение $e\Phi$. Однако для дальнейшего важно то, что единая процедура определения $e\Phi$ и ее измерений по всем трем спектрам имеет одну, общую для всех спектров систематическую погрешность.

Эксперименты проводились в следующих условиях. Поверхность GaAs подвергалась облучению ионами с энергией 2 кэВ и плотностью тока $j = 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ в течение времени, необходимого для стабилизации поверхностных свойств. После этого плотность тока ионов уменьшалась в 500 раз и осуществлялось измерение серий спектров N^+ , N^- , N^e , параметром в которых являлось время t , прошедшее с момента

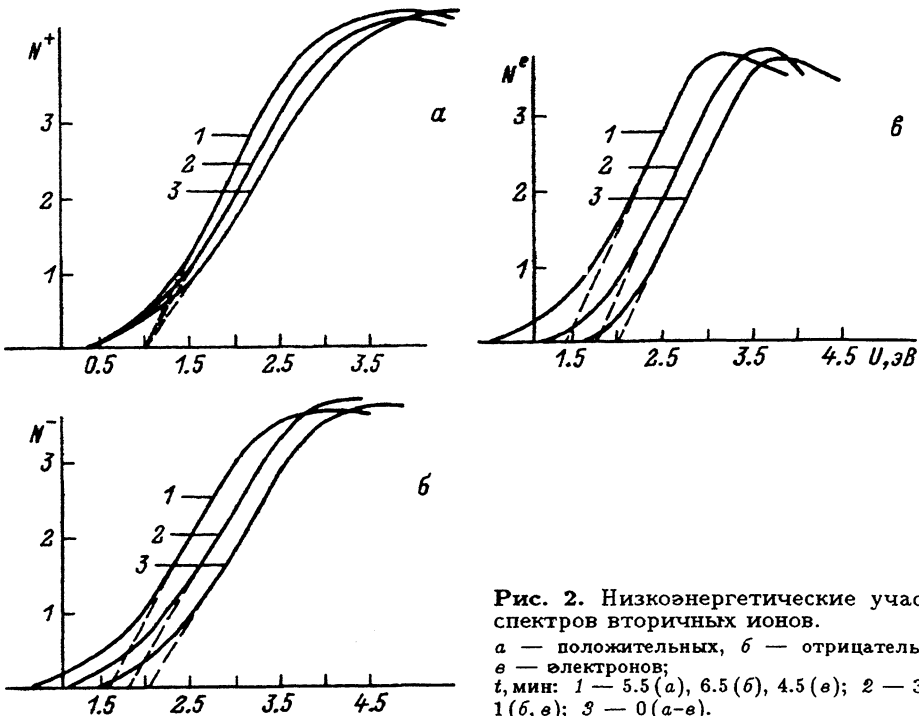


Рис. 2. Низкоэнергетические участки спектров вторичных ионов.

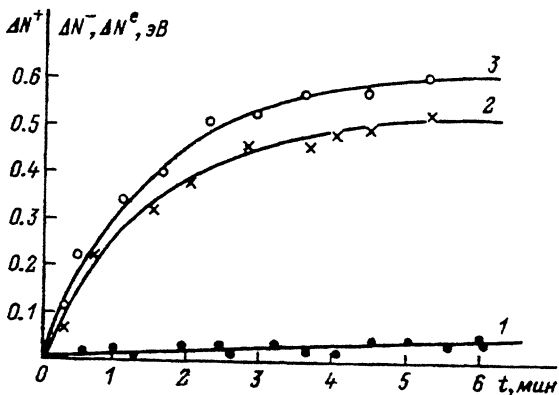
a — положительных, *б* — отрицательных, *e* — электронов;
t, мин: 1 — 5.5 (*a*), 6.5 (*б*), 4.5 (*e*); 2 — 3 (*a*),
 1 (*б*, *e*); 3 — 0 (*a-e*).

уменьшения плотности тока ионов j . Уменьшение j должно приводить к дополнительной адсорбции остаточных газов на поверхность GaAs. В результате этого через некоторое время состояние поверхности изменялось и характеризовалось новым элементным составом, возможно, количеством дефектов и т.д. Все это в свою очередь изменяло работу выхода. Заметим, что в этом конкретном случае точное знание причин, приведших к изменению $e\Phi$ не является существенным.

Для сохранения неизменных условий эксперимента независимо от того, какой из спектров регистрируется — электронный или ионный, поверхность GaAs подвергалась совместному облучению первичных электронов и ионов, которые воздействовали на одну и ту же область поверхности образца. Особое внимание при записи N^- и N^e уделялось тщательному отделению вторичных электронов от отрицательных ионов с помощью отключения внешнего магнитного поля.

Результаты таких измерений представлены на рис. 3. Видно, что изменение работы выхода поверхности GaAs при адсорбции остаточных газов существенно по-разному проявляется в спектрах вторичных ионов и электронов: смещение низкоэнергетического края спектров отрицательных ионов, равно как и вторичных электронов, демонстрирует изменение $e\Phi$, причем на очень близкую величину 0.5 и 0.6 эВ соответственно. Наоборот, энергетическое положение спектра положительных вторичных ионов практически не является чувствительным к изменению работы выхода. Заметим, что приведенные результаты относятся только к смещению энергетического положения спектров. Сами же спектры $N^{\pm, e}$, их форма, амплитуда, положение максимума

Рис. 3. Зависимость смещения энергетического положения спектров положительных ΔN^+ (1), отрицательных ΔN^- (2) ионов и электронов ΔN^e (3) при адсорбции остаточных газов.



претерпевают изменения, которые, однако, в данной работе не рассматриваются.

Прежде чем сделать окончательное заключение, необходимо ответить на один вопрос — изменилась ли работа выхода при адсорбции и если да, то откуда это следует? Действительно, ведь энергетическое положение N^+ не изменилось, можно ли говорить об изменении $e\Phi$? Этот вопрос мы трактуем следующим образом. Как известно из экспериментов по адсорбции, энергетическое положение низкоэнергетического края в спектре медленных вторичных электронов хорошо коррелирует с изменением работы выхода, измеренной методом Андерсона (торможение пучка электронов). Сам же метод Андерсона, бесспорно, определяет величину электронной КРП, равно как и метод Кельвина (вибрирующий конденсатор), причем оба метода эквивалентны. Поэтому измерение энергетического положения N^e спектров следует рассматривать как доказательство изменения $e\Phi$.

Для объяснения полученных экспериментальных результатов нами предлагается следующая модель. В любой из принятых в настоящее время теорий вторично-ионной эмиссии считается, что процесс ионизации вышедшей из твердого тела атомной частицы происходит на рас-

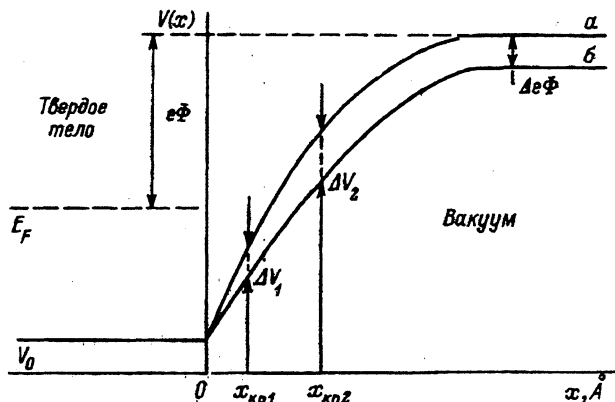


Рис. 4. Структура потенциального барьера на границе твердое тело-вакуум. а — чистая поверхность, б — модификация в процессе адсорбции.

стоянии $x_{кр}$ порядка нескольких Å от поверхности твердого тела. На таких расстояниях, как было показано в ряде работ [2,3], приближение потенциального барьера как резкой ступеньки на границе твердое тело–вакуум не вполне корректно, так как в этой области помимо сил зеркального изображения определенную роль играет двойной электрический слой. Пренебрегая тонкой структурой барьера, моделируем его как более плавно возрастающую функцию координаты (например, как показано на рис. 4). Процесс ионизации вторичной частицы с образованием положительного или отрицательного иона будет происходить на различных расстояниях от поверхности ($x_{кр1}$ и $x_{кр2}$ соответственно). Это различие связано с тем, что радиусы положительных и отрицательных ионов будут различны, и это приводит к тому, что для прекращения электронного обмена отрицательному иону нужно дальше отойти от поверхности.

Теперь рассмотрим ситуацию, когда в результате адсорбции уменьшается работа выхода, что приводит в простейшем случае к снижению потенциального барьера. Рассматривая процесс ионизации вторичных частиц, мы замечаем, что положительные и отрицательные ионы по-разному чувствуют изменение барьера (величина ΔV_1 для положительных ионов и ΔV_2 для отрицательных). Этот факт и объясняет, почему спектры смещаются на различные величины.

Электрон как частица с малой массой и большой длиной дебройлевской волны λ_e нечувствителен к структуре барьера на таких масштабах и поэтому чувствует лишь конечный результат при $x \gg x_{кр1,2}$, который мы описываем как изменение работы выхода. Так как $x_{кр2}$ соответствует уже более пологому ходу потенциала, то и не будет большой разницы в положении энергоспектров для отрицательных вторичных ионов и электронов. Напротив, для положительных ионов изменения будут значительными.

Необходимо отметить, что предложенная модель не учитывает тонкую структуру барьера и поэтому является приближением реальной картины. Тем не менее она позволяет качественно объяснить экспериментальные результаты и принципиально восстановить реальную форму барьера на границе твердое тело–вакуум.

Список литературы

- [1] Ершов С.Г., Кораблев В.В., Немченко Р.Л. // Поверхность. 1983. № 1. С. 73.
- [2] Bennet A.T., Duke C.B. // Phys. Rev. 1969. Vol. 188. P. 188.
- [3] Baribeau Y.M., Garette Y.D. // Surf. Sci. 1981. Vol. 112. N 4. P. 241.

