

УДК 537.534

Ф. Ф. УМАРОВ¹, Ш. Ш. САРСЕМБИНОВ², К. М. МУКАШЕВ³, Н. Н. БАЗАРБАЕВ¹

ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ИОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ, РАССЕЯННЫХ ПОВЕРХНОСТЯМИ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ

Экспериментально исследована рассеяние низкоэнергетических ионов Cs + ($E_0 = 30 \div 500$ eV) на поликристаллических поверхностях Ta, W, Re и рассеяние ионов K⁺ на поликристаллических поверхностях Ti, V, Cr в целях выявления механизма рассеяния ионов низких энергий и выяснение возможности его использования для анализа поверхностных слоев.

Интерес к исследованию взаимодействия ионов низких энергий с поверхностью твердого тела обусловлен как развитием методов диагностики поверхности ионными пучками, так и развитием технологий процессов ионной имплантации, эпитаксии, ионно-плазменного осаждения, а также необходимостью более полного понимания механизмов явлений и процессов, сопровождающих взаимодействие ион–поверхность [1–3].

В представленной статье экспериментально исследовано рассеяние ионов Cs⁺ на поверхностях Ta, W, Re и ионов K⁺ на поверхностях Ti, V, Cr при низких начальных энергиях ионов ($E_0 = 80–500$ эВ) для уточнения механизма рассеяния в целях возможности использования рассеяния медленных ионов для анализа поверхностных слоев материалов. Выбор материала мишеней обусловлен тем, что соотношения масс сталкивающихся частиц $\mu = m_2/m_1$ для обеих троек мишеней примерно равны (μ – отношение массы атома мишени m_2 к массе иона m_1), а энергии связи атомов мишеней различаются. Углы падения $\psi = 55^\circ$ и рассеяния $\theta = 70^\circ$ соответствовали углу зеркального отражения. Доля сохраняемой энергии возрастает при уменьшении энергии бомбардирующих ионов.

Эксперимент. Измерение дифференциальных энергетических спектров рассеянных ионов проводили на экспериментальном приборе, обладающем высоким угловым ($\Delta\varphi = 0,6^\circ$) и энергетическим ($\Delta E/E = 1/125$) разрешением (энергоанализатор типа сферический дефлектор) и способном анализировать вторичные ионы по массам с помощью времяпролетной методики. Ионы щелочных металлов получали в термоионном источнике, в рабочих условиях плотность тока на мишень была $5 \cdot 10^{-7}$ А/см². Энергия первичных ионов $E_0 = 30 \div 500$ эВ. Мишени обезгаживались прогревом электронной бомбардировкой в вакууме

$p = 10^{-8}–10^{-7}$ Тор при температуре $T \approx 0,7 \div 0,8 T_{\text{пл}}$ (плавления). В режиме измерения для нагрева мишени использовалась импульсная электронная бомбардировка, а регистрация спектров проводилась при отсутствии ускоряющего импульса электронной бомбардировки. Падающий и рассеянный пучки лежали в одной плоскости с нормалью, восстановленной к поверхности мишени в точке падения. Спектры регистрировались в режиме счета с использованием многоканального анализатора импульсов, затем обрабатывались на ЭВМ для процедуры сглаживания [4].

Результаты и их обсуждение. Экспериментально исследовано рассеяние ионов на поликристаллических мишенях Cs⁺ на Ta, W, Re и ионов K⁺ на Ti, V, Cr. Углы падения $\psi = 55^\circ$ и рассеяния $\theta = 70^\circ$ соответствовали условию зеркального отражения. На рис. 1 представлены измеренные дифференциальные энергетические спектры рассеянных ионов для пар Cs⁺→Ta ($\mu \approx 1,36$), Cs⁺→W ($\mu \approx 1,38$), Cs⁺→Re ($\mu \approx 1,40$) и K⁺→Ti ($\mu \approx 1,23$), K⁺→V ($\mu \approx 1,30$), K⁺→Cr ($\mu \approx 1,33$) в интервале начальных энергий $E_0 = 80 \div 500$ эВ при температуре мишеней $T = 0,8 T_{\text{пл}}$ К.

Видно, что форма спектров во всех случаях подобна, характеризуется пиком в области низких энергий. При уменьшении E_0 положения максимумов спектров для всех мишеней смещаются в сторону сохранения большей относительной энергии. Заметим, что менее всего сдвиг максимумов проявляется в случае рассеяния ионов цезия на вольфраме, а также в случае рассеяния ионов калия на ванадии.

Известно, что в случае парных упругих столкновений энергия, сохраняемая рассеянным ионом, при заданном угле рассеяния зависит от соотношения масс сталкивающихся частиц и положение максимумов энергетических спектров должно оставаться постоянным, а само положение

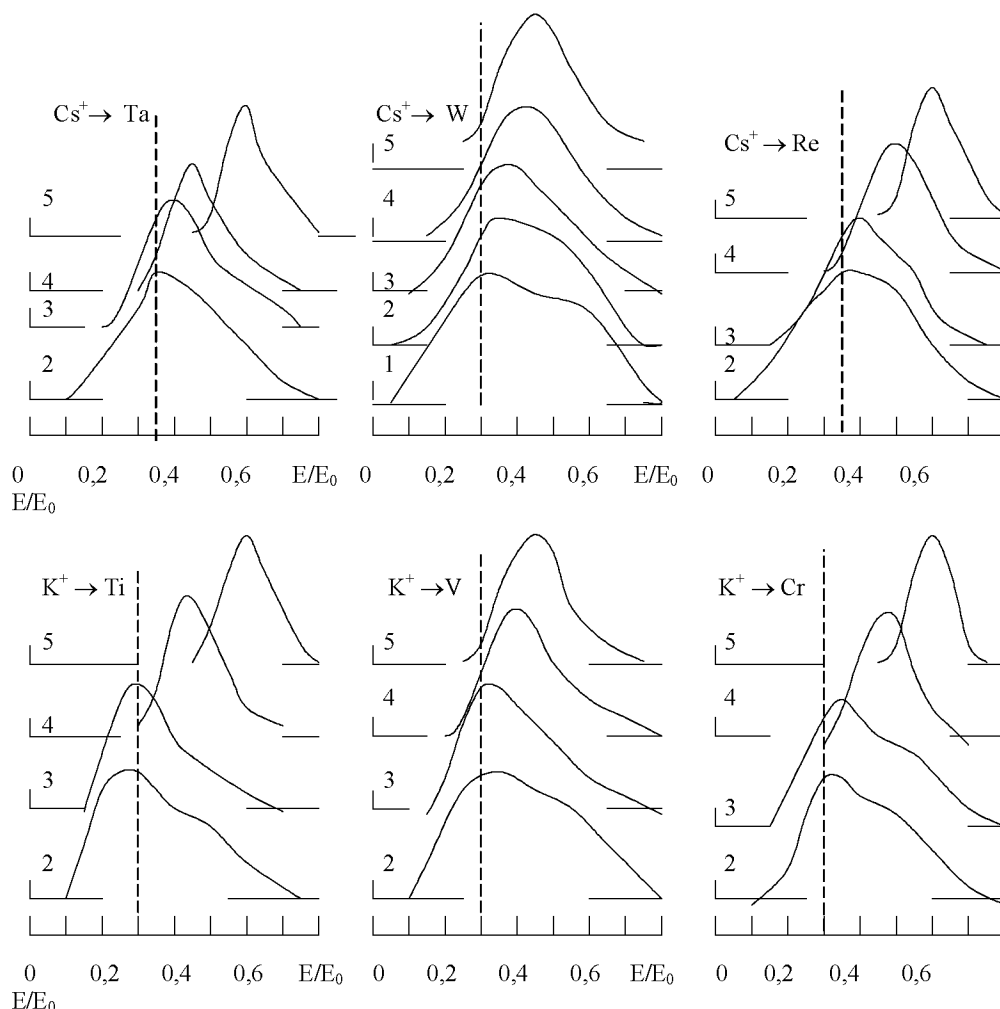


Рис. 1. Дифференциальные спектры рассеяния ионов Cs^+ и K^+ на соответствующих поликристаллических мишенях при E_0 (эВ) = 1–500, 2–400, 3–200, 4–100, 5–80. Штриховая линия-расчет по формуле (1)

максимумов можно определить приближенно по формуле

$$E = E_0 * \{ [\cos\theta \pm \sqrt{(m_2/m_1)^2 - \sin^2\theta}] / [1+m_2/m_1] \}^2, \quad (1)$$

где E – энергия рассеянных частиц; E_0 – энергия первичных ионов; θ – угол рассеяния. На рис. 1 можно наблюдать сдвиг максимумов от расчетного положения. Расчеты проведены для $\mu=1,3$ при однократном рассеянии. Сравнение энергий связи атомов этих мишеней показывает, что наибольшими значениями энергий связи в первой тройке мишеней обладают атомы вольфрама W ($E_{cb}=8,66$ эВ), во второй тройке мишеней – атомы ванадия V ($E_{cb}=5,3$ эВ). Как отмечено ранее, именно для этих пар наблюдается наименьший сдвиг положений максимумов в спектрах относительно положений, рассчитанных по формуле (1).

Отметим, что в первой тройке энергия связи атомов мишени для Ta ($E_{cb}=8,089$ эВ), для Re ($E_{cb}=8,10$ эВ). Аналогично во второй тройке для Ti ($E_{cb}=4,86$ эВ), для Cr ($E_{cb}=4,10$ эВ). Таким образом, мы наблюдаем, что сдвиг максимумов зависит от энергии связи атомов мишеней.

На рис. 2 и 3 представлены зависимости относительной энергии, сохраняемой рассеянными ионами E_m/E_0 в максимуме кривой распределения по энергиям ионов Cs^+ , рассеянных поликристаллическими Ta , W , Re и ионов K^+ , рассеянных поликристаллическими Ti , V , Cr , от начальной энергии налетающих ионов. Видно, что кривые зависимостей доли энергии, сохраняемой рассеянными ионами, от начальной энергии имеют один и тот же вид. Отметим, что во всем исследованном интервале первичных энергий E_0 наблюдается существенный рост относительной энергии E_m/E_0

Рис. 2. Зависимости относительной энергии, сохраняемой рассеянными ионами, в максимуме энергетического распределения от начальной энергии налетающих ионов Cs⁺

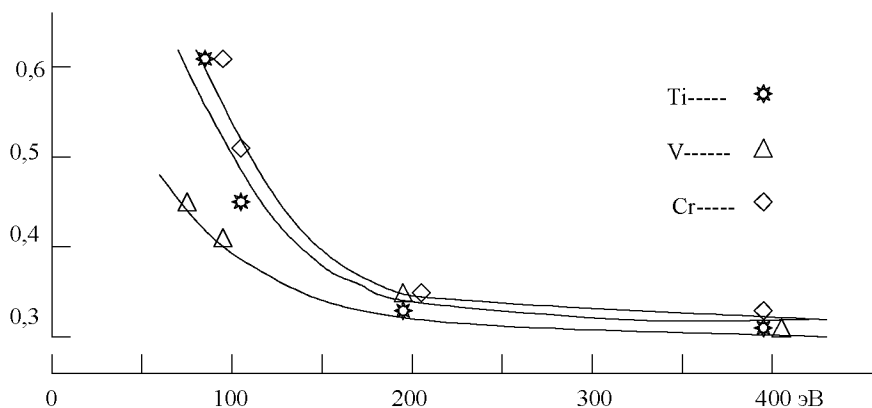
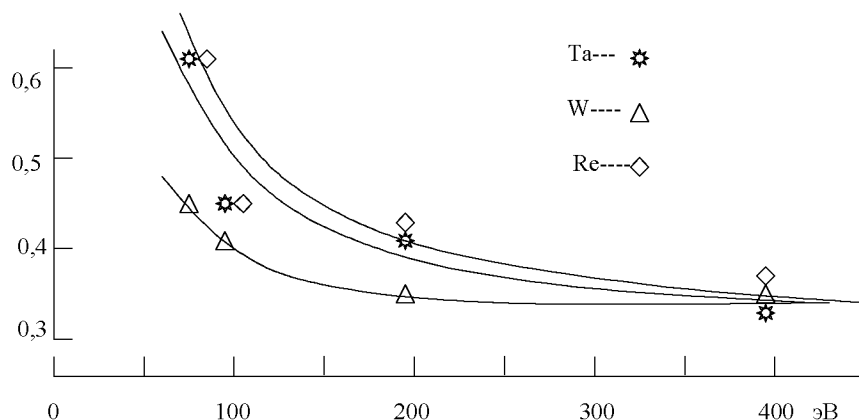


Рис. 3. Зависимости относительной энергии, сохраняемой рассеянными ионами, в максимуме энергетического распределения от начальной энергии налетающих ионов K⁺

(E_m – энергия рассеянных ионов в максимуме энергетического распределения) с уменьшением E_0 .

При этом кривые для мишеней с близкими значениями E_{cb} практически совпадают. Заметим также, что ниже всех расположены кривые для ванадия и вольфрама, у которых, как отмечалось, наибольшие значения энергий связи атомов. Для них также наблюдается более пологий рост относительной энергии. Рост E_m/E_0 с уменьшением E_0 , совпадение кривых для Ta и Re в отличие от рассеяния на W, соответственно сходство кривых для Ti и Cr в отличие от V свидетельствуют о влиянии энергии связи атомов мишени на процесс рассеяния, что говорит, по нашему мнению, о непарном характере взаимодействия низкоэнергетических ионов Cs⁺ и K⁺ при рассеянии на исследованных мишенях, для которых $\mu > 1$.

Ранее нами было показано [5], что при рассеянии медленных ионов на мишенях с массами атомов, меньшими массы бомбардирующих ионов, когда $\mu < 1$, при углах падения $\varphi = 45^\circ$ и рассеяния $\psi = 90^\circ$, также соответствующих углу зеркального отражения, наблюдалась аналогичная картина.

Дифференциальные спектры рассеяния ионов цезия на алюминии, кремнии, кобальте и никеле

имели также куполообразную форму и, максимумы кривых претерпевали сдвиг в сторону больших энергий по мере уменьшения энергии первичных ионов. Но в отличие от результатов рассеяния на мишенях с $\mu > 1$, представленных в настоящей работе, наибольший сдвиг наблюдался при рассеянии на мишенях с наименьшими энергиями связи атомов мишеней.

На рис. 4 представлены зависимости относительной энергии, сохраняемой рассеянными ионами E_m/E_0 в максимуме кривой распределения по энергиям ионов Cs⁺, рассеянных соответственно для пар Cs⁺ → Al ($\mu \approx 0,20$), Cs⁺ → Si ($\mu \approx 0,21$), Cs⁺ → Co ($\mu \approx 0,44$) и Cs⁺ → Ni ($\mu = 0,44$). Энергии связи атомов для алюминия $E_{cb} = 3,34$ эВ/атом, кобальта $E_{cb} = 4,387$ эВ/атом, никеля $E_{cb} = 4,435$ эВ/атом, кремния $E_{cb} = 4,64$ эВ/атом. Отметим, что в этом случае зависимости также имеют характерный вид, доля сохраняемой энергии в максимумах энергетических распределений увеличивается с уменьшением E_0 , причем кривая для алюминия с наименьшим значением энергии связи атомов мишени расположена ниже всех, т. е. доля сохраняемой при рассеянии энергии при этом наименьшая.

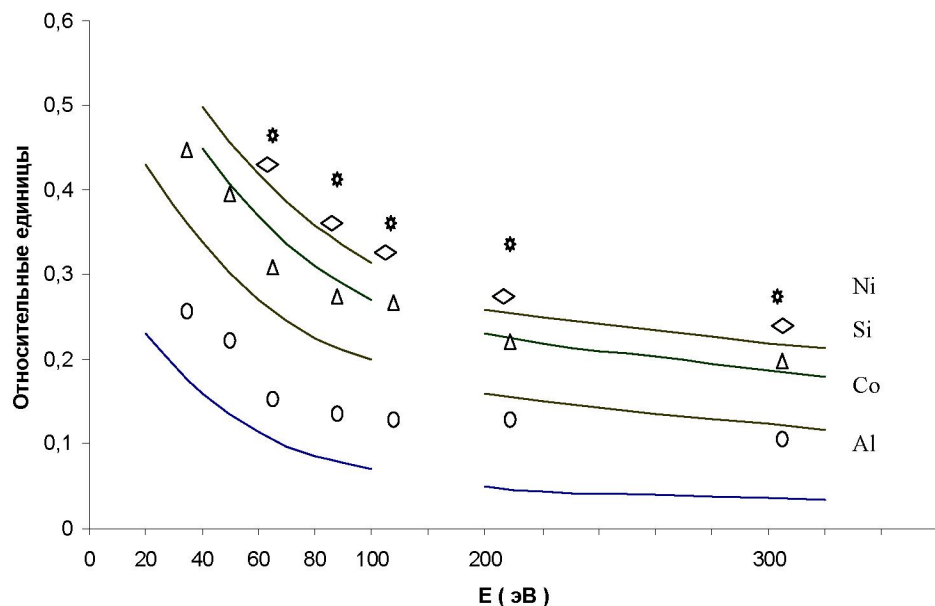


Рис. 4. Зависимости относительной энергии, сохраняемой рассеянными ионами E/E_0 , в максимуме энергетических распределений ионов Cs^+ , рассеянных поверхностями алюминия, кобальта, никеля и кремния, от начальной энергии

Сопоставление кривых (рис. 2–4) показывает, что при рассеянии медленных ионов наблюдается корреляция между энергией связи атомов мишеней и долей сохраняемой ионами энергии в максимумах энергетических распределений. Причем эта корреляция наблюдается как при рассеянии на мишенях с $\mu < 1$, так и при $\mu > 1$. В то же время мы видим, что при рассеянии медленных ионов на мишенях с малой атомной массой ($\mu < 1$) доля сохраняемой энергии наименьшая на мишенях с наименьшим значением энергии связи, а на мишенях с близкими к массе ионов атомными массами ($\mu > 1$) эта ситуация наблюдается на мишенях с наибольшим значением энергии связи. Кривые располагаются друг над другом, соответственно энергиям связи атомов мишеней, что говорит о влиянии энергии связи атомов мишеней на процесс рассеяния.

Таким образом, обнаруженная корреляция между относительной энергией, сохраняемой рассеянными ионами, и энергией связи атомов мишеней указывает, по нашему мнению, на многочастичный (групповой) характер взаимодействия, т.е. на взаимодействие налетающего иона одновременно с несколькими связанными между собой атомами поверхности. Из полученных результатов следует, что механизмы многочастичного (группового) взаимодействия должны быть различными для случаев прямого и обратного соотношения масс сталкивающихся частиц. Для объяснения полученных результатов необходимо проведение компьютерного моделирования процесса рассеяния низкоэнергетических ионов на

поликристаллических поверхностях как в приближении парных столкновений, так и с учетом энергии связи атомов мишеней.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mashkova E.S., Molchanov V.A.* Medium Energy Ion Reflection from Solids, North-Holland, Amsterdam, 1985.
2. *Parilis E.S., Kishinevsky L.M., Turaev N.Yu.* et al. Atomic Collisions on Solid Surfaces, North-Holland, Amsterdam, 1993.
3. *Машикова Е.С., Молчанов В.А.* Применение рассеяния ионов для анализа твёрдых тел. М.: Энергоатомиздат, 1995.
4. *Евстифеев В.В., Крылов Н.М., Кудряшова Л.Б.* Поверхность // Физика, химия, механика. 1992. № 5. С. 24.
5. *Umarov F.F., Bazarbaev N.N., Kudryashova L.B., Krylov N.M.* // Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res. 2002. В 196. P. 155.

Резюме

Төменгі энергиядағы ($E_0 = 30 \div 500$ eV) Cs^+ иондарының Та, W, Re поликристалдарымен, ал K^+ иондарының Ti, V, Cr поликристалдарымен әсерлесу нәтижесін эксперименталдық түрде талдай отырып, олардың шашырату механизмін анықтап, оны металдардың беттік қабатының қасиеттерін зерттеу үшін қолдану мәселесі қарастырылады.

Summary

The interaction of low-energy ions with solid surfaces has recently drawn considerable interest. This interest is defined by both the development of methods of diagnostics with use of ion beams, technology of ion-plasma deposition, ion beam epitaxy, ion implantation, and by necessity of full understanding of the mechanisms of the phenomena that follow the interaction of atomic particles with the solid surface.

¹Казахстанско-Британский технический университет;

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби;

³Казахский национальный педагогический университет им. Абая

Поступила 9.02.07г.