

УДК 537.534

Ф. Ф. УМАРОВ<sup>1</sup>, Ш. Ш. САРСЕМБИНОВ<sup>2</sup>, К. М. МУКАШЕВ<sup>3</sup>, Н. Н. БАЗАРБАЕВ<sup>1</sup>

## 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<sup>+</sup> 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<sup>+</sup> на поверхностях Ta, W, Re и ионов K<sup>+</sup> 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 ( $\mu$  – 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.

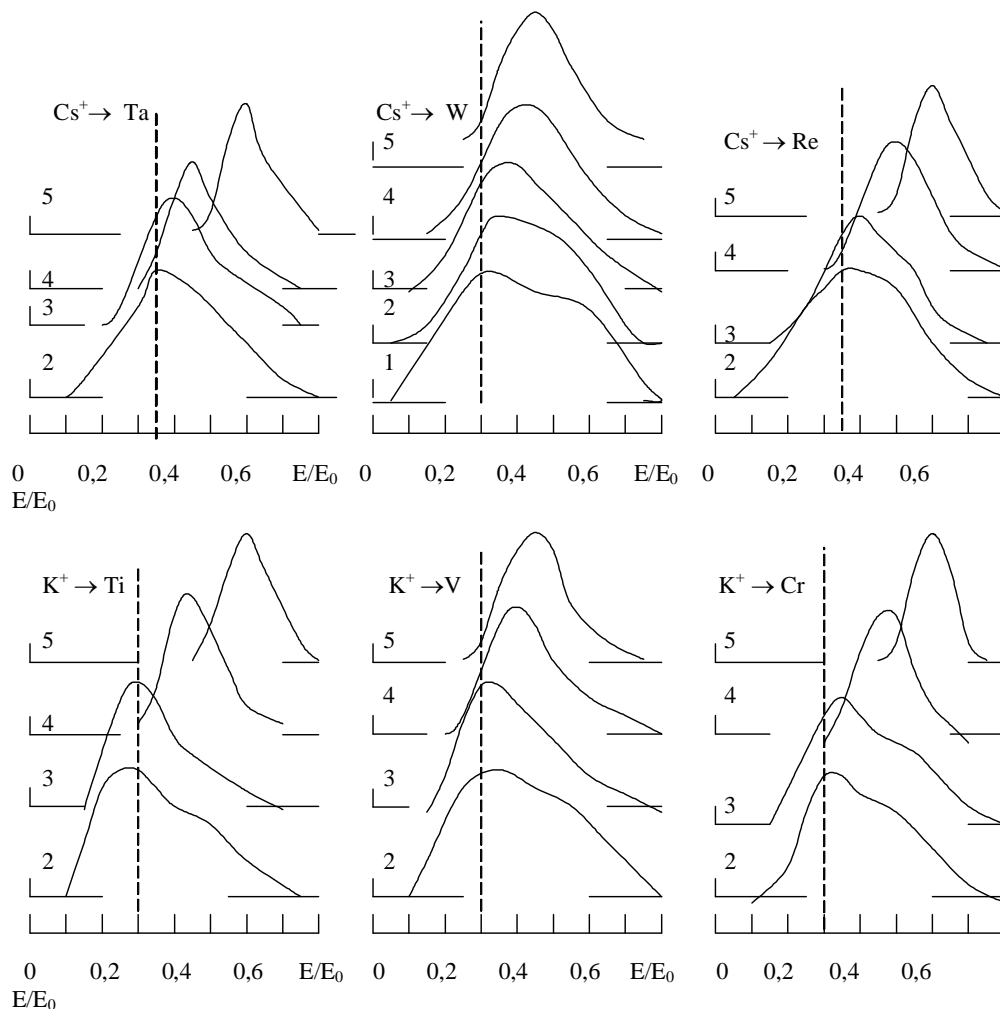
**Эксперимент.** Измерение дифференциальных энергетических спектров рассеянных ионов проводили на экспериментальном приборе, обладающем высоким угловым ( $\Delta\varphi = 0,6^\circ$ ) и энергетическим ( $\Delta E/E = 1/125$ ) разрешением (энергоанализатор типа сферический дефлектор) и способном анализировать 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/см<sup>2</sup>. Энергия первичных ионов  $E_0 = 30 \div 500$  эВ. Мишени обезгаживались прогревом электронной бомбардировкой в вакууме

$p = 10^{-8}–10^{-7}$  Тор при температуре  $T \approx 0,7 \div 0,8 T_{пл}$  (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<sup>+</sup> на Ta, W, Re и ионов K<sup>+</sup> 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<sup>+</sup>→Ta ( $\mu \approx 1,36$ ), Cs<sup>+</sup>→W ( $\mu \approx 1,38$ ), Cs<sup>+</sup>→Re ( $\mu \approx 1,40$ ) и K<sup>+</sup>→Ti ( $\mu \approx 1,23$ ), K<sup>+</sup>→V ( $\mu \approx 1,30$ ), K<sup>+</sup>→Cr ( $\mu \approx 1,33$ ) в интервале начальных энергий  $E_0 = 80 \div 500$  эВ при температуре мишеней  $T = 0,8 T_{пл}$  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  $E_0(\text{эВ}) = 1-500, 2-400, 3-200, 4-100, 5-80$ . Штриховая линия-расчет по формуле (1)

максимумов можно определить приближенно по формуле

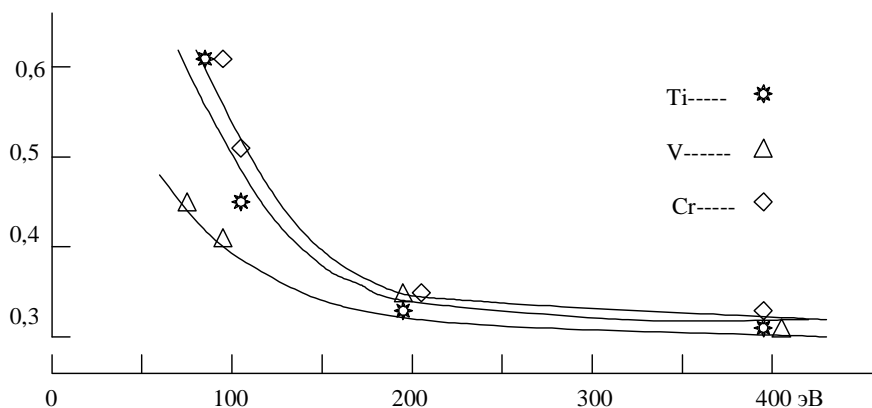
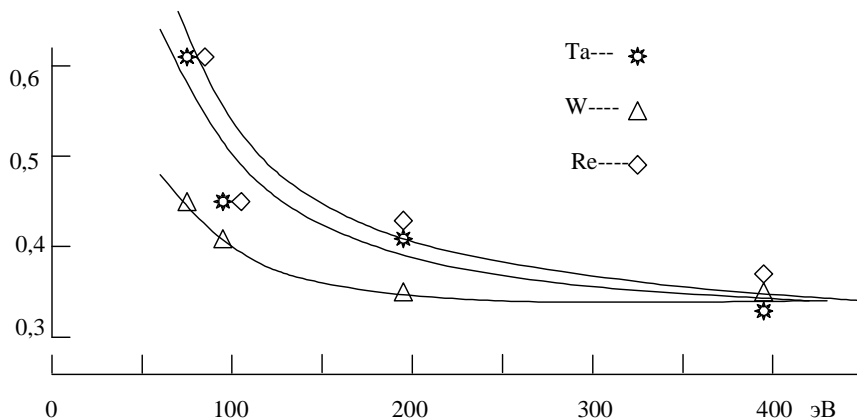
$$E = E_0 * \left\{ \frac{[\cos\theta \pm \sqrt{(m_2/m_1)^2 - \sin^2\theta}]}{[1+m_2/m_1]} \right\}^2, \quad (1)$$

где  $E$  – энергия рассеянных частиц;  $E_0$  – энергия первичных ионов;  $\theta$  – 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<sup>+</sup>



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

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

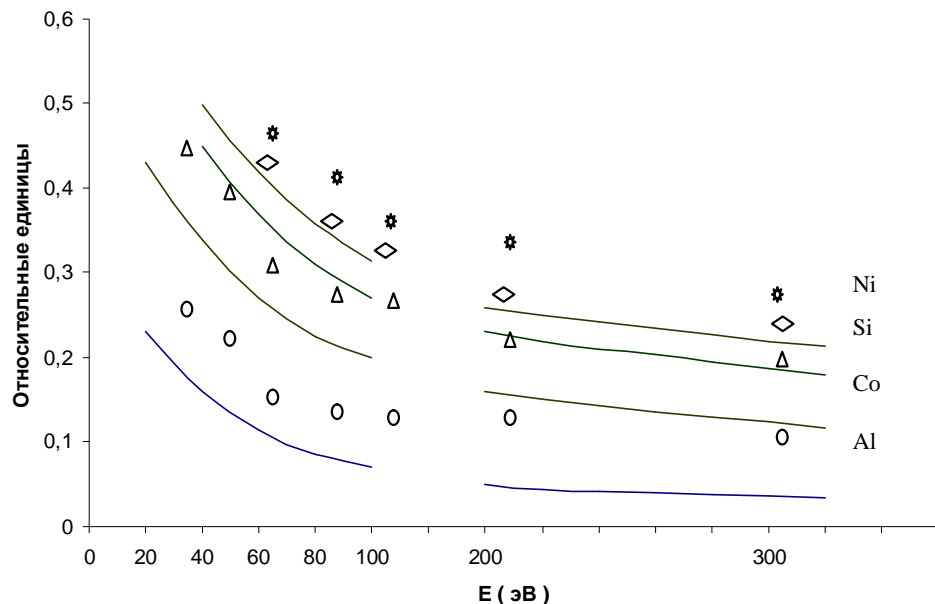
При этом кривые для мишеней с близкими значениями  $E_{св}$  практически совпадают. Заметим также, что ниже всех расположены кривые для ванадия и вольфрама, у которых, как отмечалось, наибольшие значения энергий связи атомов. Для них также наблюдается более пологий рост относительной энергии. Рост  $E_m/E_0$  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<sup>+</sup> и K<sup>+</sup> 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<sup>+</sup>, рассеянных соответственно для пар Cs<sup>+</sup> → Al ( $\mu \approx 0,20$ ), Cs<sup>+</sup> → Si ( $\mu \approx 0,21$ ), Cs<sup>+</sup> → Co ( $\mu \approx 0,44$ ) и Cs<sup>+</sup> → Ni ( $\mu = 0,44$ ). Энергии связи атомов для алюминия  $E_{св} = 3,34$  эВ/атом, кобальта  $E_{св} = 4,387$  эВ/атом, никеля  $E_{св} = 4,435$  эВ/атом, кремния  $E_{св} = 4,64$  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.

<sup>1</sup>Казахстанско-Британский технический университет;

<sup>2</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби;

<sup>3</sup>Казахский национальный педагогический университет им. Абая

Поступила 9.02.07г.