

ТОНКАЯ СТРУКТУРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВТОРИЧНО-ИОННОЙ ЭМИССИИ ИМПЛАНТИРОВАННОГО АРГОНА

А.А.Косячков, В.Т.Черепин, С.М.Чичкань

Обнаружена тонкая структура энергетических и угловых распределений эмиссии вторичных ионов аргона, имплантированного в поверхность Мо (100). Распределения содержат два максимума, которые соответствуют двум состояниям атомов аргона в решетке монокристалла.

Развитие методов диагностики состояния инертного газа, внедренного ионной бомбардировкой в поверхность твердого тела, является важным этапом изучения радиационной стойкости материалов и совершенствования технологий микроструктурирования поверхности ионными пучками. Для концентрационного анализа имплантированных атомов широко применяют сопутствующее распылению поверхности явление вторично-ионной эмиссии (ВИЭ) ¹. К сожалению, масс-спектры ВИЭ химически инертного газа не позволяют определять его состояние, например, находится имплантированное вещество в виде одиночных атомов, или в виде микропузырьков, формирующихся в приповерхностной области исследуемого материала. Можно предположить, что такая информация содержится в энергетических и угловых распределениях ВИЭ инертного газа, которые можно измерить с помощью разрабатываемого метода вторично-ионной масс-спектрометрии с высоким энергетическим и угловым разрешением. Подобные исследования до настоящего времени не проводились. Однако недавно обнаружено ², что тонкая структура энергетических распределений имплантируемых и одновременно распыляемых нейтральных атомов аргона отображает состояние атомов аргона в решетке кремния.

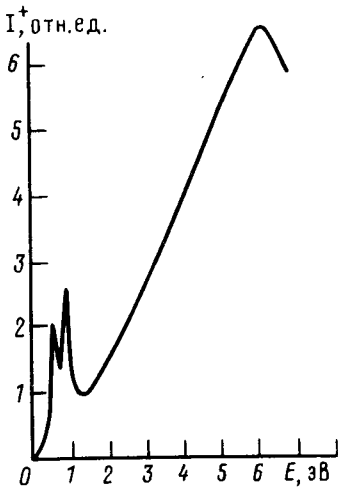


Рис. 1

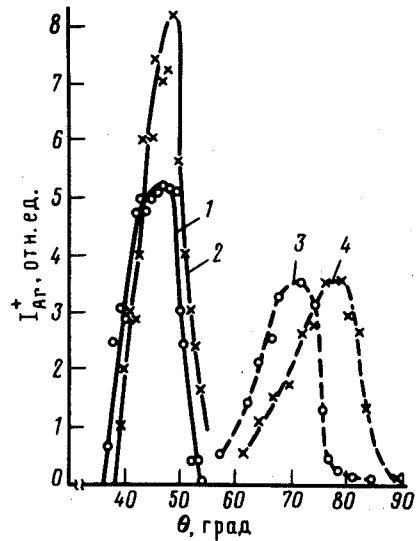


Рис. 2

Рис. 1. Энергетическое распределение ВИЭ при $\alpha = 45^\circ$ и $\theta = 46^\circ$

Рис. 2. Полярные распределения ВИЭ аргона при $\alpha = 45^\circ$ (—) и $\alpha = 0^\circ$ (----). E_m : 1 — 0,5; 2 — 0,8; 3 — 0,4; 4 — 1,2 эВ

Исследование чувствительности ВИЭ к состоянию инертного газа выполнено с помощью сверхвысоковакуумного спектрометрического комплекса с высоким энергетическим (0,1 эВ), пространственным ($8,6 \cdot 10^{-3}$ см) и масс-спектральным (1М) разрешениями ³. В качестве тест-объекта использовали грань (100) монокристалла молибдена, имплантацию и одновре-

менное распыление которой осуществляли ионами аргона с энергией 6 кэВ и плотностью тока ионов $2 \cdot 10^{-4} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. Геометрию исследования варьировали за счет изменения полярных углов бомбардировки (α) и выхода ионов (θ), отсчитываемых от нормали в плоскости (010), перпендикулярной поверхности Мо (100). Измерения проводили в бесполовом пространстве в условиях стабилизации ВИЭ аргона, наступавшей при дозах облучения порядка $10^{17} - 10^{18} \text{ ат} \cdot \text{см}^{-2}$. Однако абсолютные значения энергии могут оказаться завышенными, т. к. их измеряли с точностью до постоянной, но неизвестной контактной разности потенциалов между бомбардируемой поверхностью образца и поверхностью анализатора вторичных ионов.

На рис. 1 представлен энергетический спектр не сепарированных по массам вторичных ионов. В результате их масс-спектрометрического анализа было установлено, что высокоэнергетический пик с энергией максимума $E_m = 6,1 \text{ эВ}$ соответствует моно- и полиатомным вторичным ионам молибдена, а два пика, $E_m = 0,5 \text{ эВ}$ и $E_m = 0,8 \text{ эВ}$ — эмиссии вторичных ионов аргона. Таким образом представленные на рис. 1 результаты подтверждают предположение о наличии тонкой энергетической структуры ВИЭ имплантированного аргона. Обнаружено, что структура энергетического спектра соответствует двум характерным распределениям вторичных ионов по направлениям эмиссии. Как видно из рис. 2, энергии максимума и угловые распределения вторичных ионов аргона зависят от направления имплантации и распыления поверхности молибдена, определяемого углом α .

Наличие двух пиков в энергетических и угловых распределениях ВИЭ свидетельствует о том, что атомы имплантированного аргона находятся в решетке молибдена в двух различных состояниях. Эти энергетические особенности ВИЭ имеют общие черты с энергетическими распределениями нейтральных атомов аргона, измеренными в работе ². В обоих случаях энергетическое расщепление максимумов составляет несколько десятых электронвольта и его величина изменяется вместе с энергетическим положением максимумов в зависимости от условий имплантации, варьируемых температурой образца из кремния ² или неометрией бомбардировки поверхности молибдена (рис. 2). По мнению авторов работы ² тонкая структура E -распределений нейтральных атомов аргона соответствует ионно-стимулированной десорбции диффундирующих на поверхность кремния атомов имплантированного газа (низкоэнергетический пик) и вскрытию по мере распыления поверхности кремния микропузырьков, наполненных аргоном (высокоэнергетический пик). Результаты рассмотренных в работе ⁴ электронно-микроскопических исследований состояния инертных газов, имплантированных в поверхность молибдена и других металлов, также подтверждают наличие микропузырьков, внутреннее давление в которых оказывается иногда достаточным для кристаллизации инертного газа в твердую фазу.

Следовательно, обнаруженная в настоящей работе тонкая энергетическая структура ВИЭ обусловлена различием в энергетических состояниях атомов аргона, находящихся в поверхности молибдена в виде одиночных атомов и в виде микропузырьков образований. С учетом отмеченной в начале статьи неопределенности в измерении абсолютных значений E_m , их относительное положение, т. е. разница между энергиями максимумов E -распределений, содержит информацию о различии потенциальных энергий атомов аргона в двух состояниях. Следуя выводам работы ² и представленным на рис. 1, 2 данным можно заключить, что средняя потенциальная энергия на один атом аргона в микропузырьке составляет, как минимум, несколько десятых электронвольта. Это свидетельствует о значительном давлении внутри микропузырьков, которое может приводить к кристаллизации аргона в твердую фазу.

Наблюдаемое в эксперименте не типичное для ВИЭ аномально-узкое угловое распределение эмиссии вторичных ионов имплантированного аргона также соответствует развиваемым представлениям. Действительно, ионно-стимулированная десорбция характеризуется острой направленностью в пространстве ⁵. Фокусирующее действие напряжений решетки молибдена испытывают и атомы аргона, находящиеся при высоком давлении в микропузырьках при их вскрытии со стороны распыляемой поверхности.

Литература

1. Черепин В.Т. Ионный зонд. К. : Наукова думка, 1981.
2. Van Veen G.N.A., Sanders F.H.M., Dieleman J. et al. Phys. Rev. Lett., 1986, 57, 6, 739.
3. Черепин В.Т., Косячков А.А., Дубинский И.Н., Исьянов В.Э. ПТЭ, 1986, 1, 155.
4. Evans J.H., Mazeu D.J. Sci. Metallurgica, 1985, 19, 621.
5. Вичев Р.Г., Косячков А.А., Черепин В.Т. IV Всесоюзная конференция по масс-спектрометрии, Сумы, 1986, 7, 25.

Институт металлофизики
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
30 ноября 1987 г.
