

## Краткие сообщения

11;12

### Энергетическое распределение ионов металлов и инертных газов, прошедших через монокристаллические пленки меди

© З.А. Исаханов

Институт электроники им. У.А. Арифова АН Узбекистана,  
100125 Ташкент, Узбекистан  
e-mail: isakhanov@aie.uz

(Поступило в Редакцию 6 сентября 2011 г. В окончательной редакции 23 декабря 2011 г.)

Сравнительное исследование энергетического распределения ионов, прошедших через монокристаллические пленки меди, показало, что потери энергии каналированных и неканалированных ионов зависят не только от массы, но и от радиуса бомбардирующих ионов. Установлено, что энергетические спектры прошедших ионов очень чувствительны к изменению состава и структуры исследуемых пленок. Поэтому по изменению этих спектров можно оценить степень разупорядочения тонких пленок при различных воздействиях.

#### Введение

В последние годы достаточно подробно изучены основные закономерности прохождения ионов активных металлов через тонкие поли- и монокристаллические пленки Cu, Al и Si [1,2]. На основе полученных результатов установлено, что в случае монокристаллических образцов на энергетическом спектре ионов щелочных металлов, прошедших через тонкие пленки меди, обнаруживается три явно выраженных максимума: 1 — максимум, обусловленный эффектом осевого каналирования; 2 — максимум, обусловленный ионами, испытывающими плоскостное каналирование, и 3 — максимум, соответствующий ионам, прошедшим кристалл беспорядочным (нормальным) образом. При этом с ростом энергии ионов ( $E_0 = 10-40$  keV) наблюдается линейное увеличение потерь энергии, как для каналированных, так и беспорядочно прошедших ионов. С ростом массы ионов также происходит увеличение всех видов потерь энергии. Однако до сих пор в литературе нет достаточных сведений об энергетических спектрах ионов инертных газов, прошедших через тонкие свободные пленки (металлов). Практически отсутствуют данные о влиянии размеров ионов на их распределения по энергиям.

Настоящая работа посвящена сравнительному исследованию влияния массы и типа ионов на структуру энергетических спектров ионов, прошедших через тонкие пленки меди.

#### Методика эксперимента

Монокристаллические пленки меди с различной толщиной, выращивались на грани монокристалла NaCl с ориентацией (100). Монокристаллическая пленка, выращенная с указанной ориентацией и помеченная кристаллографическими направлениями (которые определялись

с помощью заметки, сделанной на подложке, т.е. на грани (100) NaCl), устанавливалась на гониометрическое устройство-держатель мишени (пленки) с пятью степенями свободы таким образом, что плоскость падения пучка первичных ионов совпадала с плоскостью падения  $\{001\}$  монокристаллической пленки Cu(100). При этом направление пучка первичных ионов совпадало с осью  $\langle 100 \rangle$  кристалла. Геометрия эксперимента такова, что при угле падения пучка ионов  $\varphi = 0^\circ$  на грань Cu(100), его направление совпадает с осью  $\langle 001 \rangle$  кристалла меди, а изменение угла падения пучка ионов осуществлялось поворотом кристалла вокруг оси  $\langle 001 \rangle$  Cu. Вакуум в рабочей камере составлял  $(10^{-6} - 10^{-7})$  Pa.

#### Экспериментальные результаты и их обсуждение

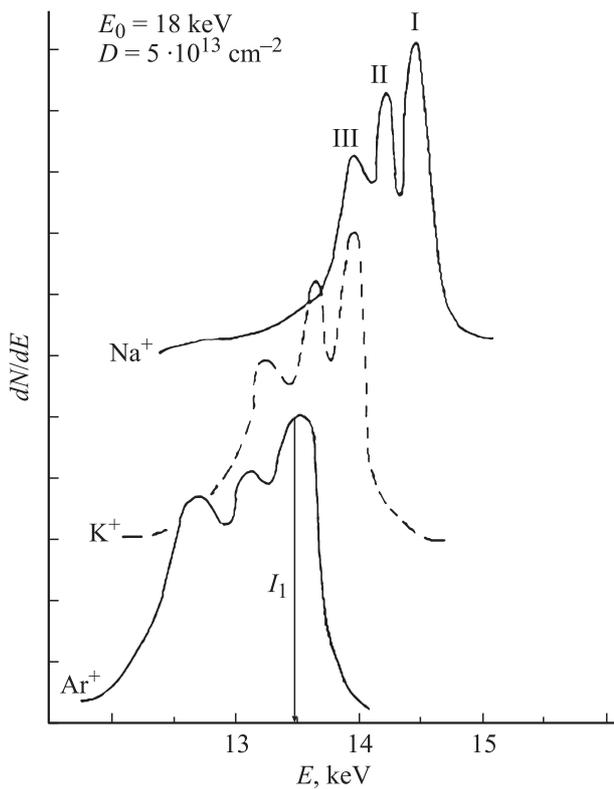
Для конкретности и корректного сопоставления данных здесь приводятся экспериментальные результаты, полученные для (одного направления монокристаллической меди) Cu(100) толщиной 450 Å при энергии ионов  $E_0 = 18$  keV, падающих на поверхность по нормали ( $\varphi = 0^\circ$ ). Чтобы избежать заметного разупорядочения поверхности, эксперименты проводились при дозе ионов  $D \leq 5 \cdot 10^{13}$  cm $^{-2}$ . На рис. 1 приведены энергетические распределения ионов Na $^+$ , K $^+$  и Ar $^+$ , прошедших через тонкие пленки меди. Видно, что в этих спектрах четко обнаруживаются все три максимума. Потери энергии составляет для ионов

Na $^+$ : I —  $\Delta E_1 = 3.6$ ; II —  $\Delta E_2 = 3.9$ ; III —  $\Delta E_3 = 4.1$  keV;

K $^+$ : I —  $\Delta E_1 = 4.1$ ; II —  $\Delta E_2 = 4.5$ ; III —  $\Delta E_3 = 4.8$  keV;

Ar $^+$ : I —  $\Delta E_1 = 4.5$ ; II —  $\Delta E_2 = 4.9$ ; III —  $\Delta E_3 = 5.3$  keV.

Сравнение этих спектров, полученных в одинаковых условиях, показывает, что при переходе от Na $^+$  к K $^+$

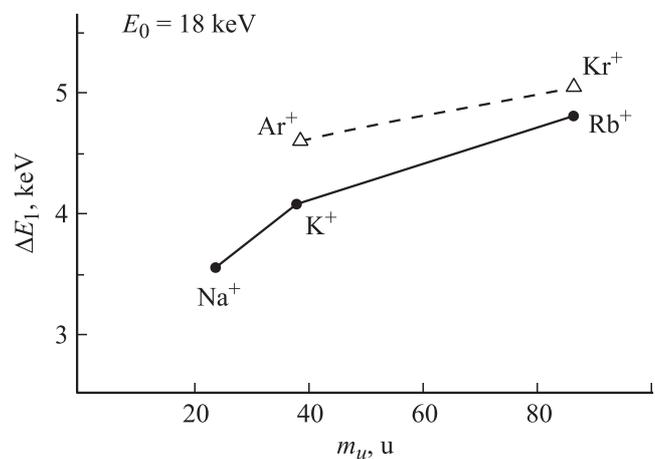


**Рис. 1.** Энергетическое распределение ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  и  $\text{Ar}^+$ , прошедших через пленку  $\text{Cu}(100)$  толщиной  $450 \text{ \AA}$ .  $\Delta E_1$ ,  $\Delta E_2$ ,  $\Delta E_3$  — потери энергии, соответствующие пикам I, II, III;  $E_0$  — энергия первичных ионов,  $I_1$  — интенсивность первого пика.

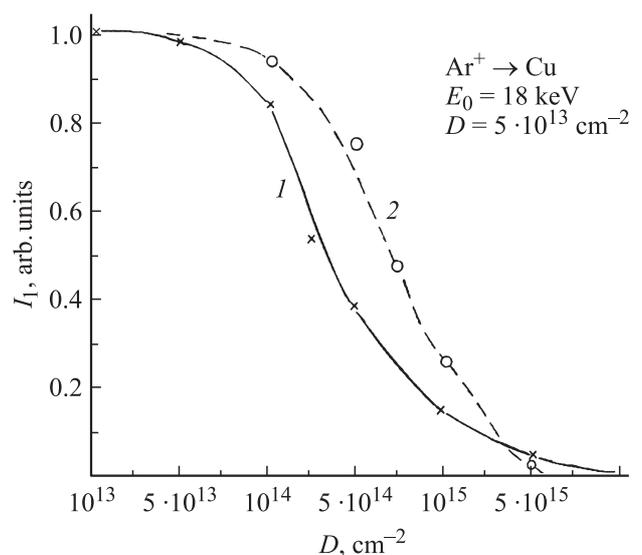
и  $\text{Ar}^+$  положение всех максимумов смещается в сторону больших потерь энергии, происходит некоторое увеличение их ширины, наблюдается увеличение интенсивности третьего (диффузного) максимума относительно первого и второго. Следовательно, можно полагать, что увеличение массы ионов приводит к увеличению всех видов потерь энергий и увеличению числа неканализованных ионов. Последнее связано с увеличением потери энергии при упругих столкновениях с атомами пленки. Все эти особенности более ярко выражены при бомбардировке  $\text{Cu}(100)$  ионами  $\text{Ar}^+$ , хотя  $\text{Ar}^+$  и  $\text{K}^+$  имеют практически одинаковую массу. В частности, в случае  $\text{K}^+$  потеря энергии  $\Delta E_1 \approx 4.1 \text{ keV}$ , а в случае  $\text{Ar}^+$  —  $\Delta E_1 \approx 4.5 \text{ keV}$ . Наблюдаемые эффекты объясняются отличием ионных радиусов  $\text{K}^+$  и  $\text{Ar}^+$ . Радиус иона аргона ( $r_{\text{Ar}} = 1.88 \text{ \AA}$ ) значительно больше, чем радиус иона  $\text{K}^+$  ( $r_{\text{K}} = 1.33 \text{ \AA}$ ). Аналогичные эффекты наблюдались и в случае бомбардировки пленок ионами  $\text{Rb}^+$  ( $r_{\text{Rb}} = 1.48 \text{ \AA}$ ) и  $\text{Kr}^+$  ( $r_{\text{Kr}} \approx 2 \text{ \AA}$ ). На рис. 2 представлена зависимость потери энергии по первому максимуму от массы ионов при бомбардировке пленок  $\text{Cu}$  ионами щелочных металлов и инертных газов. Видно, что с ростом массы ионов щелочных металлов сначала (от  $\text{Na}^+$  к  $\text{K}^+$ ) наблюдается быстрый рост потери энергии  $\Delta E_1$ , а затем этот рост замедлен от  $\text{K}^+$  к  $\text{Rb}^+$ . В случае ионов инертных газов величина потери энергии при почти одинаковой

массе заметно больше, чем в случае ионов щелочных металлов.

Энергетические спектры прошедших ионов очень чувствительны к изменению состава и структуры исследуемых пленок. Поэтому по изменению этих спектров можно оценить степень разупорядочения тонких пленок при различных воздействиях. Наши исследования показали, что интенсивность пиков, обусловленных каналированными частицами, монотонно уменьшается с ростом степени разупорядочения, а интенсивность третьего пика увеличивается. Разупорядочение поверхности осуществлялось бомбардировкой ионами  $\text{K}^+$  и  $\text{Ar}^+$  с энергией  $E_0 = 3 \text{ keV}$  разной дозой. Для резкого уменьшения эффекта каналирования ионные пучки направлялись на поверхность под углом  $15\text{--}20^\circ$  относительно нормали.



**Рис. 2.** Зависимость величины потери энергии  $\Delta E_1$  от массы ионов.



**Рис. 3.** Влияние поверхности пленки  $\text{Cu}(100)$ , разупорядоченной в результате бомбардировки ионами  $\text{Ar}^+$  (кривая 1) и  $\text{K}^+$  (кривая 2) с разными дозами, на интенсивность пика  $I_1$  ионов  $\text{Ar}^+$ , прошедших через эту пленку.  $E_0 = 18 \text{ keV}$ .

На рис. 3 приведено изменение интенсивности пика  $I_1$  (см. рис. 1) ионов  $\text{Ar}^+$  с  $E_0 = 18 \text{ keV}$ , прошедших через ионно-бомбардированную пленку. Видно, что независимо от типа ионов, которые разупорядочивали поверхность пленки, существенное уменьшение интенсивности пика прошедших (каналированных) ионов  $\text{Ar}^+$  наблюдается в области дозы  $D \approx 10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . При  $D \leq 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  скорость уменьшения  $I_1(D)$  значительно больше в случае разупорядочения ионами  $\text{Ar}^+$ , чем в случае ионами  $\text{K}^+$ , а в области  $D \geq 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  — наоборот. Наблюдаемое изменение интенсивности пика  $\Delta E_1$  при  $D \leq 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  объясняется отличием радиусов бомбардирующих ионов ( $r_{\text{Ar}} > r_{\text{K}}$ ). Результаты оже-электронной спектроскопии показали, что в области  $D \geq 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  значительная часть ионов щелочных металлов (в частности,  $\text{K}^+$ ) внедряется в приповерхностную область монокристалла и частично образует интерметаллическое соединение. По-видимому, эти процессы создают дополнительные дефектные структуры в приповерхностных слоях пленки и приводят к быстрому уменьшению количества прошедших (каналированных) ионов. Известно [3], что при ионной бомбардировке сначала ( $D = 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ) появляются отдельные аморфизированные участки (кластерные фазы), затем с ростом дозы облучения размеры этих фаз увеличиваются и, начиная с  $D \approx 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , происходит перекрывание границ отдельных островков. Поэтому по кривой  $I_1(D)$  можно оценить площадь разупорядоченной поверхности монокристалла. В частности, в случае бомбардировки ионами  $\text{K}^+$  при  $D \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  примерно 25%, а при  $D \approx 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  — 70% поверхности  $\text{Cu}$  разупорядочивается. Полная аморфизация поверхности происходит при  $D \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . Эти результаты находятся в хорошем согласии с данными, полученными ранее методом спектроскопии характеристических потерь энергии электронов [4].

## Заключение

1. Потери энергии каналированных и неканалированных ионов зависят не только от массы, но и от радиуса бомбардирующих ионов. С увеличением радиуса ионов увеличиваются все виды потерь энергии.

2. При одинаковых массах ионов всех видов, потери энергии прошедших ионов больше для ионов с большими радиусами.

3. При одинаковых условиях бомбардировки разупорядоченная поверхность зависит не только от массы, энергии и радиуса ионов, но и от концентрации внедренной примеси.

4. По зависимости интенсивности пика  $I_1$  и от дозы ионов можно оценить площадь разупорядоченной поверхности и степень его аморфизации.

Настоящая работа выполнена по гранту № ФА-Ф2-Ф102 Комитета по координации науки и технологии Республики Узбекистан и финансирована АН РУз.

## Список литературы

- [1] Алиев А.А., Арипов Х.А. // РЭ. 1983. Вып. 10. С. 2014–2020.
- [2] Алиев А.А., Мухтаров З.Э., Умаров Ф.Ф. // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. 2004. № 8. С. 10–14.
- [3] Таимухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Болтаев Э.У. // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. 2003. № 8. С. 106–109.
- [4] Исаханов З.А., Рузибаева М.К., Умирзаков Б.Е., Курбанов Р. // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. 2011. № 8. С. 66–69.