

Изучение критического угла каналирования ионов активных металлов через тонкие пленки алюминия

© З.А. Исаханов¹, Б.Е. Умирзаков², С.С. Насриддинов³, З.Э. Мухтаров¹, Р.М. Ёркулов¹

¹ Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

² Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

³ Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

E-mail: za.isakhanov@gmail.com

Поступило в Редакцию 7 июня 2021 г.

В окончательной редакции 18 августа 2021 г.

Принято к публикации 19 августа 2021 г.

Изучены пространственные распределения ионов (K^+ , Na^+), прошедших через тонкие монокристаллические пленки Al толщиной от 180 до 600 Å, и критические углы каналирования. Энергия ионов варьировалась в пределах $E_0 = 10\text{--}30\text{ keV}$. Показано, что увеличение энергии пучка первичных ионов приводит к уменьшению ширины максимумов углового распределения, что связано с уменьшением критического угла каналирования ψ_{cr} . Установлено, что ψ_{cr} для осевого каналирования не превышает $4\text{--}5^\circ$, а для плоскостного каналирования — $9\text{--}10^\circ$.

Ключевые слова: критический угол, прохождение ионов, угловое распределение, каналирование, пространственное распределение.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.23.51776.18910

Взаимодействия электронов и ионов с энергиями 10–100 keV и выше с твердым телом, в частности явления рассеяния и прохождения их через тонкие слои кристаллов, широко используются в исследованиях по физике твердого тела. Если рассеивающей средой является монокристалл, то последовательные столкновения налетающих ионов с атомами кристалла становятся сильно связанными, что приводит к появлению многих эффектов, обусловленных упорядоченным расположением атомов кристалла. Результаты экспериментальных и теоретических работ показали, что такой характер взаимодействия в свою очередь позволяет получить сведения о структуре кристалла, характере движения в нем атомных частиц, дефектообразовании и локализации примесных атомов в кристаллической решетке [1–10]. Известно, что бомбардировка ионами активных металлов с энергией 1–100 keV используется для модификации свойств поверхности и получения наноразмерных структур с заданными физическими свойствами на различных глубинах приповерхностной области материалов [11–14], а также для изучения степени монокристалличности кристаллов [2,4,7].

При бомбардировке тонких монокристаллических пленок ионами часть ионов вследствие осевого и плоскостного каналирования проходит через образец с малой потерей энергии [3,4,7]. Каналирование в первую очередь зависит от угла падения первичного пучка на поверхность образца. При этом через образец проходят те ионы, которые падают на поверхность под углом, меньшим, чем критический ψ_{cr} . Угол ψ_{cr} между траекторией частиц и осью канала, при котором еще не исчезает направляющее действие ряда атомов на ион,

называется критическим углом каналирования частицы [2]. По теоретическим оценкам Линхарда увеличение энергии пучка первичных ионов должно привести к уменьшению угла, с которого начинает проявляться эффект каналирования, т.е. происходит фокусировка иона между атомными рядами кристалла. Теоретически ψ_{cr} оценивается с помощью выражений Линхарда [2]. Для экспериментальной оценки ψ_{cr} можно использовать метод изучения пространственного распределения ионов, прошедших через свободные тонкие монокристаллические пленки, в зависимости от полярного угла падения пучка, а также от азимутального угла поворота образца.

В настоящей работе экспериментально определены критические углы каналирования ионов K^+ и Na^+ , прошедших через монокристаллические пленки Al(100) с толщиной d_{Al} от 180 до 600 Å. Полученные результаты сравнивались с теоретическими расчетами.

Исследования проводились в сверхвысоковакуумной универсальной установке при вакууме рабочей камеры $\sim (3\text{--}8) \cdot 10^{-9}$ Торр. Поверхность исследуемого образца очищалась посредством термического нагрева с тыльной стороны мишени. Чистота поверхности образца оценивалась по исчезновению оже-пиков углерода и кислорода в спектре оже-электронов. Угловая апертура детектирования анализатора типа Юза–Рожанского $\sim 0.5^\circ$. В экспериментах использован манипулятор с пятью степенями свободы: поворот образца в его плоскости; наклон по отношению ионному пучку; перемещение мишени в пучке в вертикальном, горизонтальном направлении. Привод для каждого перемещения снабжен шкалой с нониусом, позволяющим отсчитывать поворот и наклон мишени относительно пучка с точностью до 0.1° и

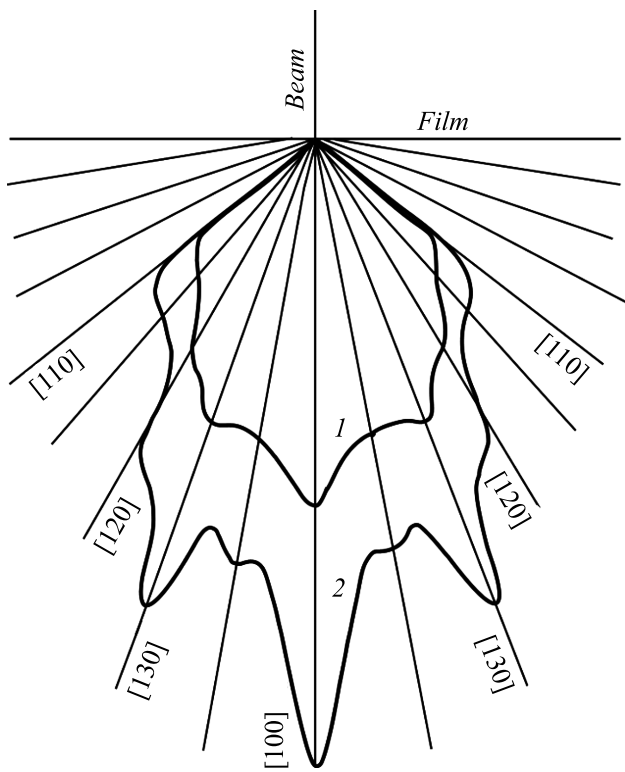


Рис. 1. Полярные диаграммы углового распределения ионов Na^+ , прошедших через монокристаллическую пленку $\text{Al}(100)$ ($d_{\text{Al}} = 450 \text{ \AA}$) при энергиях $E_0 = 20$ (1) и 30 keV (2).

ее перемещение с точностью до 0.1 mm . Манипулятор допускает поворот держателя мишени вокруг оси на 360° и смещение по вертикали и горизонтали на 20 mm , а также поворот мишени по азимуту. С учетом люфта в червячных передачах абсолютная точность установки манипулятора составляет $15'$. Источник ионов позволяет бомбардировать образец ионами с энергией от 10 до 35 keV при максимальной плотности тока 10^{-7} A/cm^2 . Диаметр ионного пятна можно регулировать с помощью одиночной линзы в пределах $0.4\text{--}2 \text{ mm}$ в зависимости от решаемой задачи.

На рис. 1 представлены полярные диаграммы углового распределения ионов Na^+ , прошедших через монокристаллическую пленку $\text{Al}(100)$ с $d_{\text{Al}} = 450 \text{ \AA}$. При получении полярных диаграмм углового распределения направление пучка первичных ионов совпадало с направлением $[100]$, вращение детектора ВЭУ-6 осуществлялось вокруг оси $\langle 001 \rangle$ кристаллической решетки, а плоскость детектирования совпадала с плоскостью $\{001\}$. Видно, что характер полярных диаграмм углового распределения резко анизотропен. На них наблюдаются четко выраженные максимумы, соответствующие кристаллографическим направлениям $[100]$, $[130]$, $[120]$, $[110]$. Увеличение энергии пучка первичных ионов приводит к уменьшению ширины максимумов углового распределения, что связано с уменьшением критического угла каналирования ψ_{cr} .

На рис. 2 представлены спектры энергетического распределения ионов Na^+ , прошедших через пленки $\text{Al}(100)$ толщиной 450 \AA . Ионы Na^+ направлялись к поверхности с $E_0 = 20 \text{ keV}$ с разными углами ($0, 5$ и 10°) относительно нормали. На спектре, полученном при падении ионного пучка по нормали к поверхности ($\varphi = 0^\circ$), обнаруживаются все три пика, характерных для монокристаллической пленки: так называемые осевое (a), плоскостное (b) и диффузное (c) прохождения [7]. При $\varphi = 5^\circ$ также обнаруживаются все три пика. Однако интенсивность пика a резко уменьшается, полуширина пика плоскостного каналирования увеличивается без заметного изменения его интенсивности. По-видимому, уменьшение числа ионов, прошедших в результате осевого каналирования, приводит к увеличению числа ионов плоскостного каналирования. Из третьего спектра ($\varphi = 10^\circ$) видно, что максимум осевого каналирования практически исчезает, плоскостное каналирование имеет очень маленькую интенсивность, положение максимума беспорядочного (диффузного) прохождения смещается в сторону меньших энергий, а полуширина этого максимума увеличивается. Последнее обусловлено увеличением числа ионов, испытавших многократные соударения с атомами мишени (пленки), что приводит к росту средней потери энергии ионами при прохождении.

На основе анализа спектров, представленных на рис. 2, можно полагать, что ψ_{cr} для осевого каналирования составляет $\sim 5^\circ$, а для плоскостного каналирования $\sim 10^\circ$. Такие же результаты получены и в случае бомбардировки $\text{Al}(100)$ ионами K^+ .

На основе этих экспериментальных данных оценены критические углы каналирования $\text{Al}(100)$, бомбардиро-

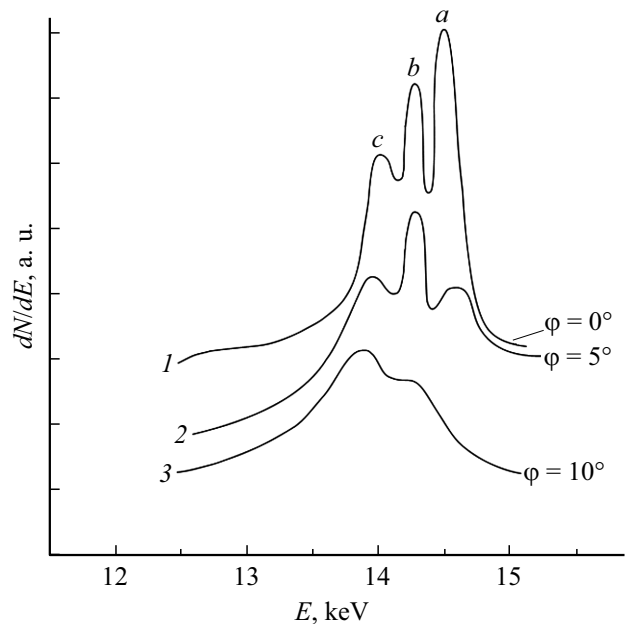


Рис. 2. Энергетическое распределение ионов Na^+ , прошедших пленку $\text{Al}(100)$ при углах падения ионного пучка $\varphi = 0$ (1), 5 (2) и 10° (3); $d_{\text{Al}} = 450 \text{ \AA}$. Энергия первичных ионов 20 keV .

Критические углы каналирования ионов активных металлов через тонкие пленки Al(100) (в градусах)

Ион	[110]		[100]		[130]		[120]	
	Эксперимент	Теория	Эксперимент	Теория	Эксперимент	Теория	Эксперимент	Теория
$E_0 = 20 \text{ keV}$								
Na ⁺	~ 8.2	8.3	~ 6.6	6.5	~ 4.6	4.4	~ 3.8	3.7
K ⁺	~ 9.7	9.6	~ 7.8	7.4	~ 5.8	5.6	~ 4.7	4.4
$E_0 = 30 \text{ keV}$								
Na ⁺	~ 8.0	8.3	~ 7.1	6.3	~ 4	4.1	~ 3.9	3.4
K ⁺	~ 8.7	8.6	~ 7.7	7.5	~ 4.9	4.4	~ 4.2	3.6

ванного ионами Na⁺, K⁺, и проведено их сравнение с расчетными данными, полученными согласно выражению Линхарда, которое относится к сравнительно низким энергиям (от 10 до 50 keV) (см. таблицу):

$$\psi_{cr} = \left[\frac{ca}{d\sqrt{2}} \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2\pi d E_0} \right)^{1/2} \right]^{1/2},$$

где $c = \sqrt{3}$; d — расстояние между атомами цепочки; Z_1 и Z_2 — атомные номера материала мишени и иона соответственно; E_0 — начальная энергия; a — параметр экранирования ($a = 0.86\phi$, ϕ — потенциал точечного заряда); e — заряд электрона.

Экспериментальные значения критических углов каналирования ψ_{cr} для данного направления кристалла оценивались исходя из полуширины максимумов угловых или пространственных распределений прошедших ионов. Сравнение их показало весьма удовлетворительное согласие. Следует также отметить, что результаты эксперимента по прохождению ионов через тонкие слои кристаллов подтверждают выводы о том, что увеличение энергии пучка первичных ионов и уменьшение массы ионов приводят к уменьшению величины критического угла каналирования.

Экспериментально оценены критические углы каналирования ионов Na⁺ и K⁺ с использованием методов изучения угловых зависимостей прохождения ионов через свободные тонкие пленки Al(100). Показано, что ψ_{cr} зависит от массы и энергии ионов. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими расчетами Линхарда. Показано, что ψ_{cr} для осевого каналирования не превышает 4–5°, а для плоскостного каналирования — 9–10°.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Mazzolari, E. Bagli, L. Bandiera, V. Guidi, H. Backe, W. Lauth, V. Tikhomirov, A. Berra, D. Lietti, M. Prest, E. Vallazza, D. De Salvador, Phys. Rev. Lett., **112**, 135503 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.135503
- [2] Й. Линдхард, УФН, **99** (10), 249 (1969). DOI: 10.3367/UFNr.0099.196910c.0249
- [3] В.П. Кошечев, Д.А. Моргун, Т.А. Панина, Изв. РАН. Сер. физ., **73** (11), 1586 (2009).
- [4] Б.Е. Умирзаков, З.А. Исаханов, М.К. Рузибаева, З.Э. Мухтаров, А.С. Халматов, ЖТФ, **85** (4), 123 (2015). [B.E. Umirzakov, Z.A. Isakhanov, M.K. Ruzibaeva, Z.E. Mukhtarov, A.S. Khalmatov, Tech. Phys., **60** (4), 600 (2015). DOI: 10.1134/S1063784215040301].
- [5] В.П. Кошечев, Ю.Н. Штанов, Д.А. Моргун, Т.А. Панина, в сб. *Тр. 22-й Международ. конф. „Взаимодействие ионов с поверхностью“* (ВИП-2015) (М., 2015), т. 1, с. 225.
- [6] А.В. Иванов, в сб. *Тр. 22-й Международ. конф. „Взаимодействие ионов с поверхностью“* (ВИП-2015) (М., 2015), т. 1, с. 221.
- [7] З.А. Исаханов, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 11, 91 (2013). [Z.A. Isakhanov, J. Synch. Investig., **7** (6), 1100 (2013). DOI: 10.1134/S1027451013060074].
- [8] U. Wienands, T.W. Markiewicz, J. Nelson, R.J. Noble, J.L. Turner, U.I. Uggerhøj, T.N. Wistisen, E. Bagli, L. Bandiera, G. Germogli, V. Guidi, A. Mazzolari, R. Holtzapple, M. Miller, Phys. Rev. Lett., **114**, 074801 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.074801
- [9] И.В. Лысова, А.Н. Михайлов, в сб. *Тр. 22-й Международ. конф. „Взаимодействие ионов с поверхностью“* (ВИП-2015) (М., 2015), т. 1, с. 229.
- [10] Г.М. Филиппов, А.С. Сабиров, В.А. Александров, А.В. Степанов, в сб. *Тр. 24-й Международ. конф. „Взаимодействие ионов с поверхностью“* (ВИП-2019) (М., 2019), т. 1, с. 196.
- [11] В.Е. Умирзаков, Д.А. Ташмухамедова, Е.У. Болтаев, А.А. Дзхуракхалов, Mater. Sci. Eng. B, **101**, 124 (2003). DOI: 10.1016/S0921-5107(02)00677-3
- [12] Б.Е. Умирзаков, Д.А. Ташмухамедова, Д.М. Мурадкбиллов, Х.Х. Болтаев, ЖТФ, **83** (6), 66 (2013). [B.E. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova, D.M. Muradkabilov, K.K. Boltayev, Tech. Phys., **58** (6), 841 (2013). DOI: 10.1134/S1063784213060261].
- [13] З.А. Исаханов, З.Э. Мухтаров, Б.Е. Умирзаков, М.К. Рузибаева, ЖТФ, **81** (4), 117 (2011). [Z.A. Isakhanov, Z.E. Mukhtarov, B.E. Umirzakov, M.K. Ruzibaeva, Tech. Phys., **56** (4), 546 (2011). DOI: 10.1134/S1063784211040177].
- [14] И.Н. Евдокимов, Поверхность, физика, химия и механика, № 3, 3 (1991).