

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ КАНАЛИРОВАНИЯ ИОНОВ АКТИВНЫХ МЕТАЛЛОВ ЧЕРЕЗ ТОНКИЕ ПЛЕНКИ АЛЮМИНИЯ

З.А. Исаханов<sup>1)</sup>, Б.Е. Умирзаков<sup>2)</sup>, С.С. Насриддинов<sup>3)</sup>, З.Э. Мухтаров<sup>1)</sup>, Р.М. Еркулов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз,  
Дурмон Йўли 33, 100125 Ташкент, Узбекистан

<sup>2)</sup>Ташкентский государственный технический университет,  
ул. Университетская 2, 100095 Ташкент, Узбекистан

<sup>3)</sup>Национальный университет Узбекистана,  
ул. Университетская 4, 100174 Ташкент, Узбекистан,

za.isakhanov@gmail.com, ftmet@rambler.ru; sfera3110@yandex.ru, Ruyoy1990@mail.ru

Изучены пространственные распределения ионов ( $K^+$ ,  $Na^+$ ), прошедших через тонкие поликристаллические и монокристаллические пленки Al с толщиной от 18 до 60 нм и критические углы каналирования. Энергия ионов варьировались в пределах  $E_0 = 10-30$  кэВ. Показано, что увеличение энергии пучка первичных ионов приводит к уменьшению ширины максимумов углового распределения, что связано с уменьшением критического угла каналирования  $\psi_{кр}$ . Установлено, что  $\psi_{кр}$  для осевого каналирования не превышает  $4-5^\circ$ , а плоскостного каналирования –  $9-10^\circ$ .

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

## STUDY OF THE CRITICAL ANGLE OF CHANNELING OF ACTIVE METAL IONS THROUGH THIN ALUMINUM FILMS

Z.A. Isakhanov<sup>1)</sup>, B.E. Umirzakov<sup>2)</sup>, S.S. Nasriddinov<sup>3)</sup>, Z.E. Muhtarov<sup>1)</sup>, R.M. Yorkulov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Uzbekistan Academy of Sciences,  
33 Durmon Yuli, 100125 Tashkent, Uzbekistan

<sup>2)</sup>Tashkent State Technical University, 2 University Str., 100095 Tashkent, Uzbekistan

<sup>3)</sup>National University of Uzbekistan, 4 University Str., 100174 Tashkent, Uzbekistan

za.isakhanov@gmail.com, ftmet@rambler.ru; sfera3110@yandex.ru, Ruyoy1990@mail.ru

The spatial distributions of ions ( $K^+$ ,  $Na^+$ ) passed through thin polycrystalline and single-crystalline Al films with the thickness from 18 to 60 nm and critical channeling angles have been studied. The ion energies have been varied within the range  $E_0 = 10-30$  keV. It has been shown that an increase in the energy of the primary ion beam leads to a decrease in the width of the maxima of the angular distribution, which is associated with a decrease in the critical channeling angle  $\psi_{cr}$ . It has been found that the value  $\psi_{cr}$  does not exceed  $4-5^\circ$  for axial channeling and  $9-10^\circ$  for planar channeling.

**Keywords:** critical angle; passage of ions; angular distribution; channeling; spatial distribution.

### Введение

Взаимодействие электронов и ионов с энергиями 10-100 кэВ и выше с твердым телом и, 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 при-

водит 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, о 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 кэВ используется для модификации свойств поверхности и получения наноразмерных структур с заданными физическими свойствами на различных глубинах приповерхностной области материалов различной природы [11-13], а также 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 меньше, чем критический  $\psi_{кр}$ . Угол  $\psi_{кр}$  между траекторией частиц и осью канала, при котором еще не исчезает направляющее действие ряда атомов на ион, Линдхард [2] назвал критическим углом каналирования частицы (иона). По теоретическим оценкам Линхарда, увеличение энергии пучка первичных ионов должно привести к уменьшению угла, с которого начинает проявляться эффект каналирования, т.е. происходить фокусировка иона между атомными рядами кристалла. Теоретически  $\psi_{кр}$  оценивается с помощью выражений Линхарда [2]. Для экспериментальной оценки  $\psi_{кр}$  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 данной работе экспериментально определены критические углы каналирования ионов, прошедших через монокристаллические пленки Al. Полученные результаты сравнивались с теоретическими расчетами.

## Методы исследования

Исследования проводились в сверхвы-

соковакуумной универсальной установке с помощью регистрации ионов, прошедших через тонкие пленки кристаллов. Рабочий вакуум в камере спектрометра составляет  $(3-8) \cdot 10^{-9}$  Тор, а поверхность исследуемого образца очищается термическим нагревом с тыльной стороны мишени (образца). Чистота поверхности образца оценивалась по исчезновению ожепиков углерода и кислорода в спектре оже-электронов. Угловая апертура детектирования анализатора типа Юза-Рожанского  $0.5^\circ$ . В экспериментах по спектроскопии использован манипулятор с пятью степенями свободы: поворот образца в его плоскости; наклон по отношению к ионному пучку; перемещение мишени в пучке в вертикальном и горизонтальном направлении. Привод для каждого перемещения снабжен шкалой с нониусом, позволяющим отсчитывать поворот и наклон мишени относительно пучка с точностью до  $0.1^\circ$  и ее перемещение с точностью до 0.1 мм. Манипулятор допускает поворот вокруг оси, нормальной к плоскости держателя образца, на  $360^\circ$ , наклон относительно пучка поворотом вокруг вертикальной оси манипулятора на  $360^\circ$  и смещение по вертикали и горизонтали на 20 мм. С учетом люфта в червячных передачах абсолютная точность установки манипулятора составляет  $15'$ . Источник ионов позволяет бомбардировать образец ионами с энергией 10-35 кэВ при максимальной плотности тока  $10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>. Диаметр ионного пятна можно регулировать с помощью одиночной линзы в пределах 0.4-2 мм в зависимости от решаемой задачи.

## Результаты и их обсуждение

Изучены пространственные распределения ионов ( $K^+$ ,  $Na^+$ ), прошедших через тонкие поликристаллические и монокристаллические пленки Al с толщиной от 18 до 60 нм. Энергия ионов варьировались в пределах  $E_0 = 10-30$  кэВ. На рис. 1 представлены полярные диаграммы углового распределения ионов  $Na^+$ , прошедших че-

рез монокристаллическую пленку Al(100). При получении полярных диаграмм углового распределения направление пучка первичных ионов совпадало с направлением [100] кристаллической решетки, а вращение детектора ВЭУ-6 осуществлялось вокруг оси <001> кристаллической решетки; плоскость детектирования совпадала с плоскостью {001}.

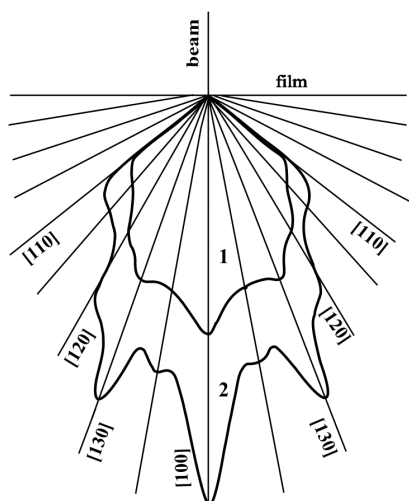


Рис. 1. Полярные диаграммы углового распределения ионов  $\text{Na}^+$ , прошедших через монокристаллическую пленку Al(100),  $d=45$  нм при разных энергиях: 1-  $E_0 = 20$  кэВ; 2-  $E_0 = 30$  кэВ  
 Fig. 1. Polar diagrams of the angular distribution of  $\text{Na}^+$  ions passing through a single crystal Al(100) film,  $d = 45$  nm at different energies: 1-  $E_0 = 20$ ; and 2-  $E_0 = 30$  keV

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  $\psi_{\text{кр}}$ .

На рис. 2 представлены спектры энергетического распределения ионов  $\text{Na}^+$ , прошедших через пленки Al(100) толщиной 45 нм. Ионы  $\text{Na}^+$  направлялись к поверхности с  $E_0=20$  кэВ под разными углами ( $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ) 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 называемое осевое (а), плоскостное (б) и диффузное (в) прохождение [7].

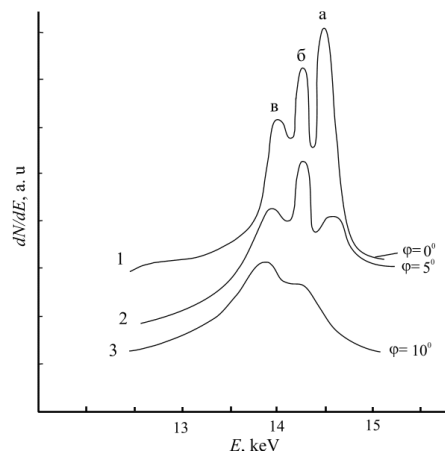


Рис. 2. Энергетическое распределение ионов  $\text{Na}^+$ , прошедших через пленку Al(100) при разных углах падения ионного пучка  $\varphi$ : 1- $0^\circ$ , 2- $5^\circ$ , 3- $10^\circ$ ;  $d_{\text{Al}}=45$  нм. Энергия первичных ионов 20 кэВ  
 Fig. 2. Energy distribution of  $\text{Na}^+$  ions passing through the Al(100) film at different angles of incidence of the ion beam  $\varphi$ : 1- $0^\circ$ , 2- $5^\circ$ , 3- $10^\circ$ ;  $d_{\text{Al}} = 45$  nm. The primary ion energy is 20 keV

При  $\varphi=5^\circ$  также обнаруживаются все три пика. Однако интенсивность пика (а) резко уменьшается, полуширина пика плоскостного каналирования увеличивается без заметного изменения интенсивности. По-видимому, уменьшение числа ионов, прошедших вследствие осевого каналирования, приводит к увеличению числа ионов плоскостного каналирования. Из третьего спектра 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 средних потерь энергии ионами при прохождении. На основе анализа спектров рис. 2 можно полагать, что  $\psi_{\text{кр}}$  для осевого каналирования составляет  $\sim 5^\circ$ , а плос-

костного каналирования  $\sim 10^\circ$ . Такие же результаты получены и в случае бомбардировки Al(100) ионами  $K^+$  и  $Rb^+$ . На основе этих экспериментальных данных оценены критические углы каналирования Al(100) при бомбардировке ионами  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Rb^+$  и проведено сравнение с расчетными данными, выполненными согласно выражению Линхарда (табл. 1):

$$\Psi_{кр} = \left[ \frac{ca}{d\sqrt{2}} \cdot \left( \frac{Z_1 Z_2 l^2}{2\pi d E_0} \right)^{1/2} \right]^{1/2}$$

где  $c=\sqrt{3}$ ;  $d$ -расстояние между атомами цепочки;  $Z$ -атомный номер образца и ионов;  $E_0$ -начальная энергия;  $a$  - параметр экранирования ( $a = 0.86f$ );  $l$ -полуширина максимума в спектре.

Таблица 1. Критические углы каналирования ионов активных металлов через тонкие пленки Al(100) (в град.)

Table 1. Critical angles of channeling active metal ions through thin Al(100) films (in deg.)

Ионы	[110]		[100]		[130]		[120]	
	Экс	Теор	Экс	Теор	Экс	Теор	Экс	Теор
E <sub>0</sub> =20 кэВ								
Na <sup>+</sup>	~8.2	8.3	~6.6	6.5	~4.6	4.4	~3.8	3.7
K <sup>+</sup>	~9.7	9.6	~7.8	7.4	~5.8	5.6	~4.7	4.4
Rb <sup>+</sup>	–	10.4	–	8.4	–	5.4	–	4.6
E <sub>0</sub> =30 кэВ								
Na <sup>+</sup>	~8.0	8.3	~7.1	6.3	~4	4.1	~3.9	3.4
K <sup>+</sup>	~8.7	8.6	~7.7	7.5	~4.9	4.4	~4.2	3.6
Rb <sup>+</sup>	–	9.7	–	7.4	–	5.7	–	4.2

Экспериментальные значения критических углов каналирования  $\Psi_{кр}$  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 иона приводят к уменьшению величины критического угла каналирования.

## Заключение

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

## Библиографические ссылки

- Mazzolari A., Bagli E., Bandiera L., Guidi V., Backe H., Lauth W. and et. al. Steering of a Sub-GeV Electron Beam through Planar Channeling Enhanced by Rechanneling. *Phys. Rev. Lett.* 2014; 112: 135503.
- Линдхард И., Влияние кристаллической решетки на некоторые атомные и ядерные процессы. *Успехи физических наук*, 1969; 99: 246-296.
- Кошечев В.П., Моргун Д.А., Панина Т.А., *Изв. РАН. Серия физическая* 2009; 73 (11): 1586-1590.
- Умирзаков Б.Е., Исаханов З.А., Рузубаева М.К., Мухтаров З.Э., Халматов А.С. Изучение профилей распределения атомов по глубине свободных нанопленочных систем типа Si-Me. *Журнал технической физики* 2015; 85 (4): 123-125.
- Кошечев В.П., Штанов Ю.Н., Моргун Д.А., Панина Т.А. Атомный, электронный и ядерный коэффициенты диффузии каналированных частиц. Труды 22-й международной конференции. ВИП-2015, (Москва), Т.1, с 225-228.
- Иванов А.В. Рассеяние заряженных частиц на цепочке атомов углерода. Труды 22-й международной конференции. ВИП-2015, (Москва), Т.1, с 221-224.
- Isakhanov Z.A. Investigation of Angular and Energy Distribution of  $Na^+$  and  $K^+$  Ions Passed through Thin Copper Films. *Journal of Surface Investigation X-ray, Synchrotron and Neutron, Techniques*, 2013; 7(6): 1100-1103.
- Wienands U., Markiewicz T. W., Nelson J., Noble R. J., Turner J. L., Uggerhøj U. I. and et. al. Observation of Deflection of a Beam of Multi-GeV Electrons by a Thin Crystal. *Phys. Rev. Lett.* 2015; 114: 074801.
- Лысова И.В., Михайлов А.Н. Энергетические характеристики каналирования атомарного пучка в нанотрубках. Труды 22-й международной конференции. ВИП-2015, (Москва), Т.1, С. 229-232.

10. Филиппов Г.М., Сабиров А.С., Александров В.А., Степанов А.В. Особенности прохождения квантовых частиц через пористые структуры. Труды 22-й международной конференции. ВИП-2019, (Москва), Т.1, С. 196-199.
11. Ergashov Y.S., Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. On the synthesis of nanoscale phases of metal silicides in the near-surface region of silicon and the study of their electronic structures by passing light. *J. of Surface Investigation* 2017; 11 (2): 480-484.
12. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Muradkabilov D.M., Boltaev K.K. Electron spectroscopy of the nanostructures created in Si, GaAs and CaF<sub>2</sub> surface layers using low-energy ion implantation. *Technical Physics* 2013; 58 (6): 841-844.
13. Isakhanov Z.A., Mukhtarov Z.E., Umirzakov B.E. and Ruzibaeva M.K. Optimum ion implantation and annealing conditions for stimulating secondary negative ion emission. *Technical Physics* 2011; 56 (4): 546-549.
- Trudy 22-y mezhdunarodnoy konferentsii. VIP-2015, (Moskva), T.1, s 225-228. (In Russian).
6. Ivanov A.V. Rasseyaniye zaryazhennykh chastits na tsepochke atomov ugleroda. Trudy 22-y mezhdunarodnoy konferentsii. VIP-2015, (Moskva), T.1, s. 221-224. (In Russian).
7. Isakhanov Z.A. Investigation of Angular and Energy Distribution of Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> Ions Passed through Thin Copper Films. *Journal of Surface Investigation X-ray, Synchrotron and Neutron, Techniques*, 2013; 7(6): 1100-1103.
8. Wienands U., Markiewicz T. W., Nelson J., Noble R. J., Turner J. L., Uggerhøj U. I. and et. al. Observation of Deflection of a Beam of Multi-GeV Electrons by a Thin Crystal. *Phys. Rev. Lett.* 2015; 114: 074801.
9. Lysova I.V., Mikhaylov A.N. Energeticheskie kharakteristiki kanalirovaniya atomarnogo puchka v nanotrubbkakh. Trudy 22-y mezhdunarodnoy konferentsii. VIP-2015, (Moskva), T.1, S. 229-232. (In Russian).
10. Filippov G.M., Sabirov A.S., Aleksandrov V.A., Stepanov A.V. Osobennosti prokhozheniya kvantovykh chastits cherez porystie struktury. Trudy 22-y mezhdunarodnoy konferentsii. VIP-2019, (Moskva), T.1, p. 196-199. (In Russian).
11. Ergashov Y.S., Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. On the synthesis of nanoscale phases of metal silicides in the near-surface region of silicon and the study of their electronic structures by passing light. *J. of Surface Investigation* 2017; 11(2): 480-484.
12. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Muradkabilov D.M., Boltaev K.K. Electron spectroscopy of the nanostructures created in Si, GaAs and CaF<sub>2</sub> surface layers using low-energy ion implantation. *Technical Physics* 2013; 58 (6): 841-844.
13. Isakhanov Z.A., Mukhtarov Z.E., Umirzakov B.E. and Ruzibaeva M.K. Optimum ion implantation and annealing conditions for stimulating secondary negative ion emission. *Technical Physics* 2011; 56 (4): 546-549.

## References

1. Mazzolari A., Bagli E., Bandiera L., Guidi V., Backe H., Lauth W. and et. al. Steering of a Sub-GeV Electron Beam through Planar Channeling Enhanced by Rechanneling. *Phys. Rev. Lett.* 2014; 112: 135503.
2. Lindhard I. Vlijanie kristallicheskoj reshetki na nekotorye atomnye i jadernye processy. *Uspehi fizicheskikh nauk* 1969; 99: 246-296. (In Russian).
3. Koshchev V.P., Morgun D.A., Panina T.A., *Izv. RAN. Seriya fizicheskaja* 2009; 73 (11): 1586-1590. (In Russian).
4. Umirzakov B.E., Isakhanov Z.A., Ruzibaeva M.K., Mukhtarov Z.Je., Khalmatov A.S. Analysis of profiles of atomic distribution over the depth of Si-Me free nanofilm systems. *Technical Physics* 2015; 60(4): 600-602.
5. Koshchev V.P., Shtanov Yu.N., Morgun D.A., Panina T.A. Atomnyy, elektronnyy i yadernyy koeffitsienty diffuzii kanalirovannykh chastits.