



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ТҰҢҒЫШ ПРЕЗИДЕНТІ - ЕЛБАСЫНЫҢ ҚОРЫ

**«ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ БІЛІМ – 2017»**

студенттер мен жас ғалымдардың  
XII Халықаралық ғылыми конференциясының  
БАЯНДАМАЛАР ЖИНАҒЫ

**СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ**

XII Международной научной конференции  
студентов и молодых ученых  
**«НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ – 2017»**

**PROCEEDINGS**

of the XII International Scientific Conference  
for students and young scholars  
**«SCIENCE AND EDUCATION - 2017»**



14<sup>th</sup> April 2017, Astana



**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ  
Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ**

**«Ғылым және білім - 2017»  
студенттер мен жас ғалымдардың  
XII Халықаралық ғылыми конференциясының  
БАЯНДАМАЛАР ЖИНАҒЫ**

**СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ  
XII Международной научной конференции  
студентов и молодых ученых  
«Наука и образование - 2017»**

**PROCEEDINGS  
of the XII International Scientific Conference  
for students and young scholars  
«Science and education - 2017»**

**2017 жыл 14 сәуір**

**Астана**

**УДК 378**

**ББК 74.58**

**Ғ 96**

Ғ 96

«Ғылым және білім – 2017» студенттер мен жас ғалымдардың XII Халықаралық ғылыми конференциясы = The XII International Scientific Conference for students and young scholars «Science and education - 2017» = XII Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Наука и образование - 2017». – Астана: <http://www.eni.kz/ru/nauka/nauka-i-obrazovanie/>, 2017. – 7466 стр. (қазақша, орысша, ағылшынша).

ISBN 978-9965-31-827-6

Жинаққа студенттердің, магистранттардың, докторанттардың және жас ғалымдардың жаратылыстану-техникалық және гуманитарлық ғылымдардың өзекті мәселелері бойынша баяндамалары енгізілген.

The proceedings are the papers of students, undergraduates, doctoral students and young researchers on topical issues of natural and technical sciences and humanities.

В сборник вошли доклады студентов, магистрантов, докторантов и молодых ученых по актуальным вопросам естественно-технических и гуманитарных наук.

УДК 378

ББК 74.58

ISBN 978-9965-31-827-6

©Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия  
ұлттық университеті, 2017

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАТЕНТНЫХ ТРЕКОВ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ КРИСТАЛЛОВ $\text{TiO}_2$ ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ

Аралбаева Г.М.\*, Сейтбаев А.\*\*

докторант\* физико-технического факультета ЕНУ им.Л.Н. Гумилева, Астана

магистрант\*\* физико-технического факультета ЕНУ им.Л.Н. Гумилева, Астана

Научный руководитель – А.Т.Акилбеков

В настоящем работе предлагается изменения структуры поверхности в кристаллах  $\text{TiO}_2$ , облученного ионами 167 МэВ Хе до флюенсов ( $2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и  $2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) и ионами Вi 1 ГэВ до флюенса ( $2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ), температура облучения комнатная. Исследования проводились с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Проведен анализ зависимости морфологии латентных треков и наноструктур на поверхности от уровня удельных ионизационных потерь энергии, поглощенной энергии (флюенса).

**Ключевые слова:** Латентный трек, хиллоки, быстрые тяжелые ионы, аморфизация, энергетические потери иона, радиус треков, длина пробега иона.

### 1. Введение.

Наблюдать морфологию латентного трека, индуцированного облучением быстрыми тяжелыми ионами можно с помощью различных методов, которые включают в себя просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ), Резерфордское обратное рассеяние в режиме каналирования (РОС/к), электронную конверсию Мессбауэровской спектроскопии (ЭКМС), и малоугловое рассеяние рентгеновских лучей (МУРР). Только один метод, а именно ПЭМ, приводит к непосредственному наблюдению латентных треков, в то время как все другие методы основаны на предположении о том, что латентные треки непрерывны и по своей природе имеют цилиндрическую форму. Это предположение в значительной степени было подтверждено многочисленными наблюдениями латентных треков с использованием ПЭМ. На сегодняшний день большинство исследований морфологии латентных (скрытых) треков быстрых тяжелых ионов в  $\text{TiO}_2$  было проведено через объемные методы отбора проб, таких как дифракция рентгеновских лучей (ДРЛ) [1] или поверхностно-чувствительные методы, такие как атомно-силовая микроскопия (АСМ) и сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) [2-5]. Некоторые исследования используют просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ), однако такие данные ограничены рассмотрением только эффектов в плоскости без определения глубины, что не позволяет судить о структуре вглубине от поверхности образца [6,7]. Первое ПЭМ наблюдение хиллоков было проведено на кристаллах  $\text{SeO}_2$  в работе [8]. До этой работы, хиллоки на поверхности характеризовались преимущественно с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ) [3,4,9,10,11]. Эти методы имеют недостатки по сравнению с ПЭМ из-за артефактов, вызванных физическим размером кончика зонда и отсутствием возможности различать кристаллические и аморфные хиллоки. В этой работе мы используем иной подход по сравнению с работой [8] для подготовки ПЭМ образцов для наблюдения хиллоков. Сфокусированный ионный пучок (СИП), на котором основан наш метод, имеет преимущество в том, что он совместим как с массивными, так и предварительно утоненными образцами, хотя аморфное углеродное покрытие, используемое в методе СИП, во время ПЭМ наблюдений в некоторой степени уменьшает контраст решетки.

В этой работе, морфология латентных треков быстрых тяжелых ионов в  $\text{TiO}_2$  была исследована в зависимости от приповерхностной глубины, а также формирование хиллоков. Используемые методики включают высокоразрешающие ПЭМ и СЭМ, а морфология треков изучена в поперечной и планарной симметрии.

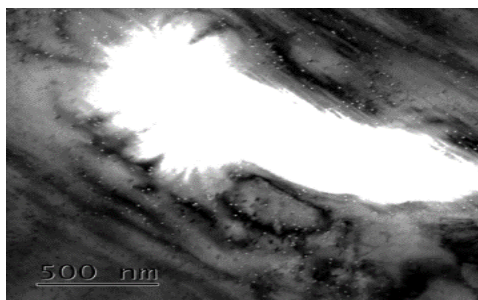
### 2. Методика исследования

Исследовались монокристаллы  $\text{TiO}_2$  со структурой рутила и с ориентацией (110) (МТИ

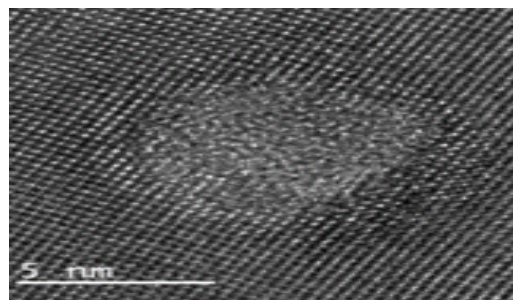
Corporation США). Образцы облучались ионами Хе с энергией 167 МэВ  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  -  $10^{14} \text{ см}^{-2}$  и ионами Вi 1 ГэВ флюенс  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  на ускорителях ИЦ-100 в ЛЯР, ОИЯИ в Дубне (Россия) и циклотроне ДЦ-60 в Астане, (Казахстан). Облучение во всех случаях проводилось при комнатной температуре. В экспериментах использовались как массивные, так и предварительно утоненные образцы. Подготовка ПЭМ образцов осуществлялась либо путем механической полировки с последующей ионной полировкой пучком Ar, либо при помощи метода сфокусированного ионного пучка. ПЭМ анализ образцов проводился в Центре высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии университета Нельсона Манделы, Порт Элизабет, ЮАР. Механически утоненные образцы полировались до 2 мкм с последующей полировкой пучком ионов Ar на установке Gatan PIPS с энергией пучка на финальном этапе 500 эВ и углом падения  $4^\circ$  для того, чтобы снизить повреждения вызванные ионами (Рис.1). Сфокусированным ионным пучком для ПЭМ прошли специальную подготовку на FEI Helios NanoLab 650. Для того чтобы сохранить особенности поверхности, перед нанесением основного защитного слоя углерода с использованием 30 кэВ пучка Ga, был нанесен слой углерода толщиной 500 нм с помощью электронного пучка. Для того чтобы защитить хиллоки на поверхности и части трека вблизи облученной поверхности, до того, как осаждать основной защитный углеродный слой пучком ионов Ga, был осажден начальный защитный слой аморфного углерода при помощи электронного пучка с ускоряющим напряжением 1 кВ. Начальный углеродный слой, по меньшей мере, имел толщину  $\sim 100$  нм, что более чем в два раза превышает максимальный пробег ионов 30 keV Ga в аморфном углероде. Этот слой успешно защищает поверхность от повреждений ионами Ga, которые в противном случае уничтожили бы мелкие детали на поверхности. В большинстве случаев, при изготовлении ПЭМ образцов методом фокусированного ионного пучка, используется защитный слой Pt, однако углерод имеет преимущество в том плане, что он имеет меньшую плотность (улучшает электронный просвет) и аморфную форму (снижает нежелательный дифракционный контраст у поверхности образца), что в противном случае было бы помехой при наблюдении контраста решетки в хиллоках. ПЭМ/СПЭМ анализ осуществлялся при помощи электронного микроскопа JEOL ARM 200F, работающего при напряжении 200 кВ. Система была оснащена спектрометром Gatan GIF Quantum EELS, используемом при оценке толщины образца. Образцы, изготовленные при помощи полировки ионами Ar, были утонены до облучения быстрыми тяжелыми ионами для того, чтобы изучить морфологию трека в зависимости от толщины образца. В этих образцах, ПЭМ ламели в продольном сечении извлекались с помощью сфокусированного ионного пучка уже после облучения.

### 3 Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показана ПЭМ микрофотография в светлом поле в планарной геометрии для отверстия в кристалле  $\text{TiO}_2$ , который был предварительно утонен до прозрачности для электронов (при помощи PIPS) до облучения быстрыми тяжелыми ионами. Видны индивидуальные латентные треки от ионов 167 МэВ Хе в виде ярких пятен около границы отверстия и темные пятна на большем расстоянии от отверстия в нижнем левом углу изображения. На рисунке 2 представлен снимок ПЭМ высокого разрешения одного из светлых пятен, которое ясно демонстрирует аморфное основание трека.



**Рисунок 1.** Микрофотография ПЭМ. В



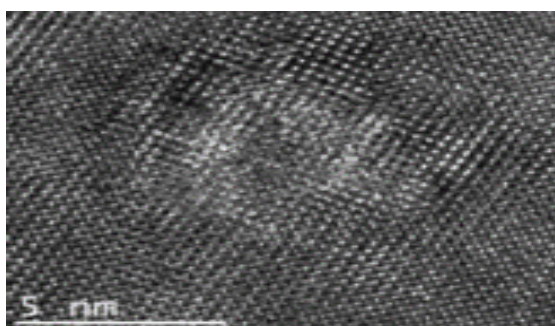
**Рисунок 2.** Снимок ПЭМ высокого

предварительно утоненном  $\text{TiO}_2$  после облучения 167 МэВ Хе до  $2 \cdot 10^{10}$  ион/см<sup>2</sup>.

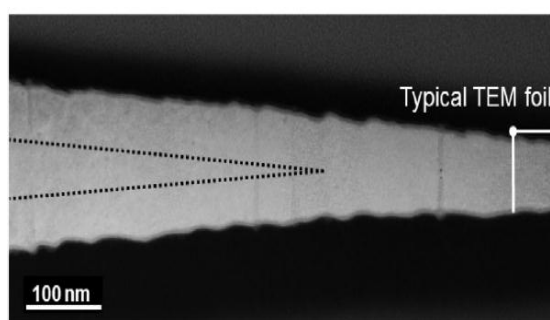
разрешения одного из светлых латентных треков

На рисунке 3 изображена ПЭМ микрофотография трека из нижнего левого угла рисунка 1, где образец значительно толще и в контрасте светлого поля темные участки соответствуют кристаллическим областям. Из рисунка 2 ясно видно, что сохраняется значительная кристалличность в основании трека (в проекции сквозь образец), а также наблюдается высокий уровень напряжения.

Снимок ПЭМ в кольцевом темном поле под высоким углом на рисунке 4 четко показывает низкую плотность конических структур, простирающихся от поверхности образца до приблизительно 80 нм внутрь (указано штрихованными линиями) в более толстых областях образца. В более тонких местах образца, возникают участки более низкой плотности, непрерывно проходящие сквозь образец. Пониженная плотность этих структур подтверждается более слабой интенсивностью сигнала при электронной микроскопии в темном поле.



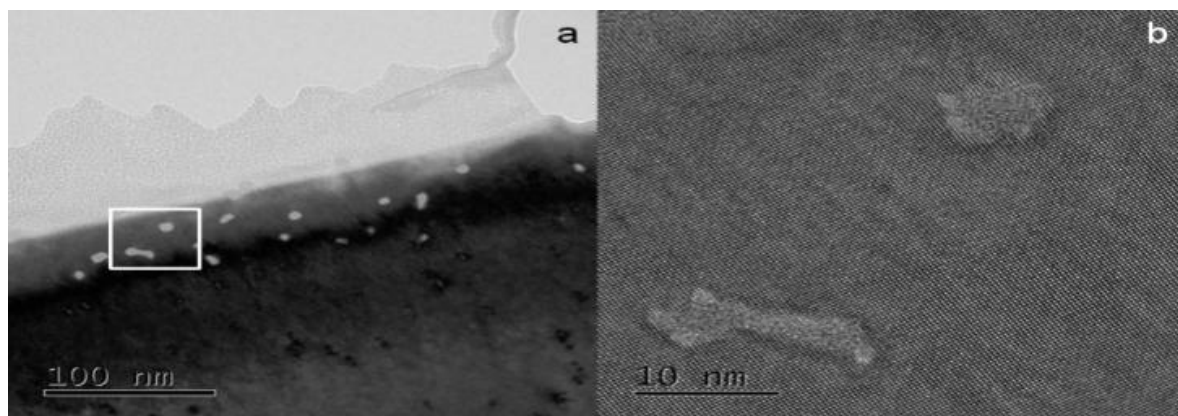
**Рисунок 3.** Снимок ПЭМ высокого разрешения одного из темных латентных треков



**Рисунок 4.** ПЭМ микрограмма, демонстрирующая непрерывные треки низкой плотности в более тонких участках образца, которые становятся прерывистыми в центральной части образца с ростом толщины

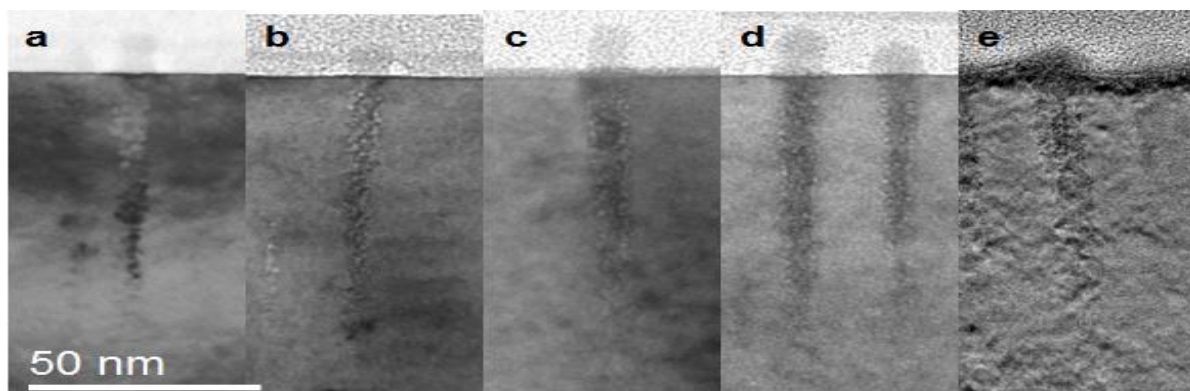
Области с меньшей плотностью имеют прикрепленные к ним хиллоки на поверхности, как на поверхности входа, так и на поверхности выхода иона из образца. Можно предположить, что хиллоки образуются в результате выхода материала на поверхность из конического участка, который после этого имеет пониженную плотность. Поскольку типичный образец ПЭМ имеет толщину менее 100 нм, легко понять, почему наблюдения, сделанные на предварительно утоненных образцах, приводят к выводу об аморфных латентных треках. Так же это и относится к образцам, утоненным после облучения, где образец утоняется от необлученной стороны в направлении к облученной поверхности

На рисунке 5 показана микрофотография ПЭМ в светлом поле участка вблизи границы кристалла  $\text{TiO}_2$ , облученного 167 МэВ Хе до  $10^{11}$  ион/см<sup>2</sup>. Образец извлекался из массивного облученного кристалла методом фокусированного ионного пучка, расположив кристалл на боковой стороне так, чтобы облученная поверхность была в плоскости изображения.



**Рисунок 5.** а) Снимок ПЭМ в планарной геометрии кристалла  $\text{TiO}_2$  облученного ионами 167 МэВ Хе. Ламель извлекалась из плоскости параллельно облученной плоскости с глубины 1,5 мкм от поверхности. б) ПЭМ снимок высокого разрешения участка, выделенного на рисунке а), демонстрирующий аморфную форму латентных треков около границы кристалла

Ламели извлекались с глубины порядка 1,5 мкм под облученной поверхностью в плоскости параллельной облученной поверхности. Первоначальная граница кристалла изображена слева направо вдоль изображения с небольшим количеством аморфного углерода, который был осажден перед обработкой фокусированным ионным пучком, вверху. Область вблизи края кристалла демонстрирует светлый контраст на ионных треках, и диаметр треков уменьшается с расстоянием от границы кристалла вглубь материала. На глубине около 70-80 нм, переход контраста латентных треков со светлого на темный указывает на смену аморфного материала на кристаллический в напряженном состоянии. Снимок ПЭМ высокого разрешения на рисунке 5b был снят на участке, выделенном на рисунке (а). Аморфная структура ионного трека явно видна на этом снимке. Треки, имеющие темный контраст, снова оказались кристаллическими, но сильно напряженными. Это наблюдение снова подтверждает, что кристаллическая/аморфная форма латентных треков определяется наличием поблизости свободной поверхности. Поскольку электронные потери энергии изменяется от 24,3 кэВ/нм у поверхности до 23,2 кэВ/нм на глубине 1,5 мкм от поверхности и 21, 5 кэВ/нм на глубине 3 мкм, мы так же можем заключить, что аморфная/кристаллическая структура не зависит сильно от  $S_e$ , возможно, кроме некоторого меньшего порогового значения для образования треков. В действительности, предыдущие результаты [2] уже указывали, что порог ионизационных потерь энергии для повреждения, наблюдаемого при помощи ПЭМ. В  $\text{TiO}_2$  находится в области 7,3 кэВ/нм. На рисунках 6(а-е) показаны ПЭМ снимки в светлом поле в сечении вдоль трека вблизи поверхности  $\text{TiO}_2$  облученного 1 ГэВ Вi (поверхность входа), 700 МэВ Вi (поверхность входа), 700 МэВ Вi (поверхность выхода из образца толщиной 14 мкм), и 167 МэВ Хе (поверхность входа) соответственно. Эти изображения соответствуют электронным потерям энергии 40,1, 39,2, 34,7, 29,9 и 24,3 кэВ/нм соответственно. Во всех случаях, общая структура конической области остается неизменной в том смысле, что все конусы демонстрируют контраст Френеля низкой плотности, указывающий, что структуры состоят из небольших диаметром 1-2 нм зон низкой плотности. Точная природа этих зон низкой плотности и окружающего материала не определена и возможно, что области между низкоплотными участками имеют кристаллическую структуру. Однако, в силу того, что толщина образца сравнима с размером структур, не возможно напрямую изобразить границу между этими зонами, которые аморфны. Все конусы присоединены на поверхности к хиллокам сферической формы с диаметром около  $10 \pm 1$  нм. Каждый конус проникает вглубь кристалла до 70-80 нм, и не зависит от  $S_e$ .



**Рисунок 6.** От (а) до (е): конические треки вблизи поверхности  $\text{TiO}_2$  облученного быстрыми тяжелыми ионами при значениях  $S_e$  40,1, 39,2, 34,7, 29,9, и 24,3 кэВ/нм соответственно

#### 4 Заключение

После прохождения быстрого тяжелого иона, кристаллическая решетка нагревается до высокой температуры вдоль оси трека из-за энергии, переданной быстрым тяжелым ионом. Однако температуры плавления и испарения будут значительно выше внутри кристалла по причине более высокого давления вокруг трека, поскольку нагретый материал начинает расширяться. Это внутреннее давление будет спадать до минимума вблизи свободной поверхности и быстро возрастать в зависимости от глубины. Вблизи поверхности, где давление достаточно мало, может возникать фактическое плавление в треке, приводя к выдавливанию материала на поверхность, где он будет образовывать хиллок. Поскольку часть материала была удалена из трека, давление будет уменьшаться дальше внутри при поверхностного объема. Как обсуждалось ранее в работе [8], форма и структура хиллоков на поверхности является важной информацией для понимания механизма передачи энергии от быстрых тяжелых ионов кристаллам, поскольку характер хиллоков тесно связан с механизмом образования как самих хиллоков, так и латентных треков. Существует некоторая неопределенность в том, как хиллоки могут рекристаллизоваться на предположительно аморфных треках. Однако ответ может быть найден в наблюдаемом размере хиллоков, который немного больше, чем диаметр аморфных латентных треков под ними. Это могло бы позволить расплавленному материалу рекристаллизоваться на шаблоне, предоставляемом кристаллическим материалом, окружающим сердцевину трека. Плотность материала внутри трека слишком мала для формирования полностью кристаллической структуры, поскольку некоторая часть материала вышла на поверхность. Эта область содержит высокую концентрацию маленьких кармашков с низкой плотностью, образованных из-за извлеченного материала. Точный характер этих участков не известен, но ПЭМ исследования показывают, что они в основном аморфные.

#### Список использованных источников

1. H. Rath, P. Dash, T. Som, P. V. Satyam, U. P. Singh et al. Structural evolution of  $\text{TiO}_2$  nanocrystalline thin films by thermal annealing and swift heavy ion irradiation // J. Appl. Phys. -2009. – Vol.105. –P.074311. doi: 10.1063/1.3103333
2. M. Thakurdesai, D. Kanjilal, and V. Bhattacharyya, "Effect of rapid thermal annealing on nanocrystalline  $\text{TiO}_2$  thin films synthesized by swift heavy ion irradiation // Applied Surface Science.-2012.-vol. 258, pp. 7855-7859.
3. R. Hazem, M. Izerrouken, A. Sari, S. Kermadi, M. Msimanga, A. Benyagoub, et al. Radiation damage induced by swift heavy ions in  $\text{TiO}_2$  sol-gel films nanocrystallines // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.-2013.-vol. 304, pp. 16-22.
4. P. Thevenard, J. P. Dupin, V. Thien Binh, S. T. Purcell, V. Semet, and D. Guillot. Electron

emission devices formed by energetic cluster impacts on TiO<sub>2</sub> rutile // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. -2000.-vol. 166–167, pp. 788-792.

5. Koichi Awazu, Xiaomin Wang, Makoto Fujimaki, Tetsuo Komatsubara, Takahiro Ikeda et al. Structure of latent tracks in rutile single crystal of titanium dioxide induced by swift heavy ions // J. Appl. Phys.-2006.Vol.100, -P.044308. doi: 10.1063/1.2229432

6. Ken-ichi Nomura, Tetsuya Nakanishi, Yoshihiro Nagasawa, Yoshimichi Ohki, Koichi Awazu, Makoto Fujimaki, Naoto Kobayashi, Satoshi Ishii, and KunihiroShima. Structural change induced in TiO<sub>2</sub> by swift heavy ions and its application to three-dimensional lithography // Phys. Rev. - 2003. –Vol. 68, - p. 064106.

7. Kabir, A. Meftah, J. P. Stoquert, M. Toulemonde, and I. Monnet. Amorphization of sapphire induced by swift heavy ions: A two step process// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.-2008.-vol. 266, pp. 2976-2980.

8. Ishikawa N., Okubo N., Taguchi T. Experimental evidence of crystalline hillocks created by irradiation of CeO<sub>2</sub> with swift heavy ions: TEM study. // Nanotechnology. 2015. Vol. 26, № 35. P. 355701.

9. Popok V.N. et al. Formation of surface nanostructures on rutile (TiO<sub>2</sub>): comparative study of low-energy cluster ion and high-energy monoatomic ion impact // J. Phys. D. Appl. Phys. IOP Publishing, 2009. Vol. 42, № 20. P. 205303.

10. Aumayr F. et al. Single ion induced surface nanostructures: a comparison between slow highly charged and swift heavy ions // J. Phys. Condens. Matter. IOP Publishing, 2011. Vol. 23

11. Akcöltekin E. et al. Creation of multiple nanodots by single ions // Nat. Nanotechnology, Publ. online 29 April 2007; | doi10.1038/nnano.2007.109. Nature Publishing Group, 2007. Vol. 2, № 5. P. 290.

ӘОЖ 533.9.03; 533.9.15

## **ОМЛ ТЕОРИЯСЫНЫҢ КӨМЕГІМЕН ТОЗАҢДЫ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ЗАРЯДТАЛУ ПРОЦЕСІН ЗЕРТТЕУ**

**Әбимолдаева А.Е.**

Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ физика-техникалық факультетінің магистранты, Астана  
Ғылыми жетекшісі – Р.Аманғалиева

Тозаңды плазма (тозаңды бөлшектерден, бейтарап бөлшектерден, электрондар мен иондарды тұратын көпкомпонентті жүйе) идеал және тепе-тең күйде сирек кездеседі. Бұл– ашық, сызықты емес, диссипативті, тепе-теңсіз жүйе [1].

Плазмадағы тозаңды бөлшек заряды мұқият зерттеуді қажет ететін негізгі мәселе болып табылады, сондықтан заряд шамасы жүйе туралы негізгі мәліметке ие және тозаңды плазманың маңызды параметрі болып есептеледі. Тозаңды бөлшектер заряды қоршаған плазманың локальді параметрі мен макробөлшектердің шамасына тәуелді. Газдық разряд плазмасында тозаңды бөлшек заряды оның жоғарғы бөлігіндегі иондар мен электрондар ағынының тепе-теңдігімен анықталады.

Мұнда цилиндрлік разряд түтігіндегі тығыздығы төмен аргонның стратталған тұрақты ток разрядында біркелкі емес плазманың кейбір нүктесінде таралған тозаңды бөлшектің зарядын табатын боламыз.

Бөлшек сфералық көлемді (бөлшек радиусы  $a \sim 2$  мкм) деп болжаймыз. Бір сыншы бөлшектің болуы Дебай радиусынан бірнеше есе артық бөлшектің айналасында разряд өрісін өзгертеді.

Ионның бейтарап газ температурасы бар болғандықтан, өрістегі қыздырылған электрон ескерілмейді. Электр өрісінен өтетін қыздырылған газ ескерілмейді.

Электрон мен ион бөлшектің бетіне түсіп рекомбинацияланады. Рекомбинация