

ISSN (Print) 2616-6836  
ISSN (Online) 2663-1296

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің

# ХАБАРШЫСЫ

---

**BULLETIN**

of L.N. Gumilyov Eurasian  
National University

**ВЕСТНИК**

Евразийского национального  
университета имени Л.Н. Гумилева

**ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ** сериясы

**PHYSICS. ASTRONOMY** Series

Серия **ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ**

№4(129)/2019

1995 жылдан бастап шығады

Founded in 1995

Издается с 1995 года

Жылына 4 рет шығады

Published 4 times a year

Выходит 4 раза в год

**Нұр-Сұлтан, 2019**

**Nur-Sultan, 2019**

**Нур-Султан, 2019**

*Бас редакторы:*  
ф.-м.ғ.д., профессор  
**А.Т. Ақылбеков** (Қазақстан)

*Бас редактордың орынбасары*

**Гиниятова Ш.Г.**, ф.-м.ғ.к., доцент  
(Қазақстан)

*Редакция алқасы*

|                          |                              |
|--------------------------|------------------------------|
| <b>Арынгазин А.Қ.</b>    | ф.-м.ғ. докторы(Қазақстан)   |
| <b>Алдонгаров А.А.</b>   | PhD (Қазақстан)              |
| <b>Балапанов М.Х.</b>    | ф.-м.ғ.д., проф. (Ресей)     |
| <b>Бахтизин Р.З.</b>     | ф.-м.ғ.д., проф. (Ресей)     |
| <b>Даулетбекова А.Қ.</b> | ф.-м.ғ.к. (Қазақстан)        |
| <b>Ержанов Қ.К.</b>      | ф.-м.ғ.к., PhD (Қазақстан)   |
| <b>Жұмаділов Қ.Ш.</b>    | PhD (Қазақстан)              |
| <b>Здоровец М.</b>       | ф.-м.ғ.к.(Қазақстан)         |
| <b>Қадыржанов Қ.К.</b>   | ф.-м.ғ.д., проф. (Қазақстан) |
| <b>Кайнарбай А.Ж.</b>    | ф.-м.ғ.к. (Қазақстан)        |
| <b>Кутербеков Қ.А.</b>   | ф.-м.ғ.д., проф. (Қазақстан) |
| <b>Лущик А.Ч.</b>        | ф.-м.ғ.д., проф.(Эстония)    |
| <b>Морзабаев А.К.</b>    | ф.-м.ғ.к. (Қазақстан)        |
| <b>Мырзақұлов Р.Қ.</b>   | ф.-м.ғ.д., проф.(Қазақстан)  |
| <b>Нұрахметов Т.Н.</b>   | ф.-м.ғ.д., проф. (Қазақстан) |
| <b>Сауытбеков С.С.</b>   | ф.-м.ғ.д., проф. (Қазақстан) |
| <b>Салиходжа Ж.М.</b>    | ф.-м.ғ.к. (Қазақстан)        |
| <b>Тлеукенов С.К.</b>    | ф.-м.ғ.д., проф. (Қазақстан) |
| <b>Усеинов А.Б.</b>      | PhD (Қазақстан)              |
| <b>Хоши М.</b>           | PhD, проф.(Жапония)          |

*Редакцияның мекенжайы:* 010008, Қазақстан, Нұр-Сұлтан қ., Сәтбаев к-сі, 2, 402 б.,  
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті.  
Тел.: +7(7172) 709-500 (ішкі 31-428)  
E-mail: vest\_phys@enu.kz

*Жауапты хатшы, компьютерде беттеген:* А. Нұрболат

**Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Хабаршысы.**  
**ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ сериясы**

Меншіктенуші: ҚР БЖҒМ "Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті" ШЖҚ РМК  
Мерзімділігі: жылына 4 рет.

Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникациялар министрлігінде 27.03.2018ж.  
№16999-ж тіркеу куәлігімен тіркелген.

Ашық қолданудағы электрондық нұсқа: <http://bulphysast.enu.kz/>

Типографияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Нұр-Сұлтан қ., Қажымұқан к-сі, 12/1, 349 б.,  
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті. Тел.: +7(7172)709-500 (ішкі 31-428)

*Editor-in-Chief*

Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor  
**A.T. Akilbekov** (Kazakhstan)

*Deputy Editor-in-Chief*

**Giniyatova Sh.G.**, Candidate of Phys.-Math. Sciences,  
Assoc. Prof. (Kazakhstan)

*Editorial Board*

|                          |   |
|--------------------------|---|
| <b>Aryngazin A.K.</b>    | Doctor of Phys.-Math. Sciences (Kazakhstan)         |
| <b>Aldongarov A.A.</b>   | PhD (Kazakhstan)                                    |
| <b>Balapanov M.Kh.</b>   | Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof. (Russia)      |
| <b>Bakhtizin R.Z.</b>    | Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof. (Russia)      |
| <b>Dauletbekova A.K.</b> | Candidate of Phys.-Math. Sciences, PhD (Kazakhstan) |
| <b>Hoshi M.</b>          | PhD, Prof. (Japan)                                  |
| <b>Kadyrzhanov K.K.</b>  | Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof. (Kazakhstan)  |
| <b>Kainarbay A.Zh.</b>   | Candidate of Phys.-Math. Sciences (Kazakhstan)      |
| <b>Kuterbekov K.A.</b>   | Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof. (Kazakhstan)  |
| <b>Lushchik A.</b>       | Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof. (Estonia)     |
| <b>Morzabayev A.K.</b>   | Candidate of Phys.-Math. Sciences (Kazakhstan)      |
| <b>Myrzakulov R.K.</b>   | Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof. (Kazakhstan)  |
| <b>Nurakhmetov T.N.</b>  | Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof. (Kazakhstan)  |
| <b>Sautbekov S.S.</b>    | Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof. (Kazakhstan)  |
| <b>Salikhodzha Z. M</b>  | Candidate of Phys.-Math. Sciences (Kazakhstan)      |
| <b>Tleukenov S.K.</b>    | Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof. (Kazakhstan)  |
| <b>Useinov A.B.</b>      | PhD (Kazakhstan)                                    |
| <b>Yerzhanov K.K.</b>    | Candidate of Phys.-Math. Sciences, PhD (Kazakhstan) |
| <b>Zdorovets M.</b>      | Candidate of Phys.-Math. Sciences (Kazakhstan)      |
| <b>Zhumadilov K.Sh.</b>  | PhD (Kazakhstan)                                    |

*Editorial address:* L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2, Satpayev str., of. 402,  
Nur-Sultan, Kazakhstan 010008  
Tel.: +7(7172) 709-500 (ext. 31-428)  
E-mail: vest\_phys@enu.kz

*Responsible secretary, computer layout:* A.Nurbolat

**Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University.**

**PHYSICS. ASTRONOMY Series**

Owner: Republican State Enterprise in the capacity of economic conduct "L.N. Gumilyov Eurasian National University" Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan

Periodicity: 4 times a year

Registered by the Ministry of Information and Communication of the Republic of Kazakhstan.

Registration certificate №16999-ж from 27.03.2018.

Available at: <http://bulphysast.enu.kz/>

Address of printing house: L.N. Gumilyov Eurasian National University, 12/1 Kazhimukan str.,  
Nur-Sultan, Kazakhstan 010008;

tel.: +7(7172) 709-500 (ext. 31-428)

*Главный редактор:*  
доктор ф.-м.н.  
**А.Т. Акилбеков**, доктор ф.-м.н., профессор (Казахстан)

*Зам. главного редактора*

**Ш.Г. Гиниятова** к.ф.-м.н., доцент  
(Казахстан)

*Редакционная коллегия*

|                          |                                   |
|--------------------------|-----------------------------------|
| <b>Арынгазин А.К.</b>    | доктор ф.-м.н.(Казахстан)         |
| <b>Алдонгаров А.А.</b>   | PhD (Казахстан)                   |
| <b>Балапанов М.Х.</b>    | д.ф.-м.н., проф. (Россия)         |
| <b>Бахтизин Р.З.</b>     | д.ф.-м.н., проф. (Россия)         |
| <b>Даулетбекова А.К.</b> | д.ф.-м.н., PhD (Казахстан)        |
| <b>Ержанов К.К.</b>      | к.ф.-м.н., PhD (Казахстан)        |
| <b>Жумадилов К.Ш.</b>    | PhD (Казахстан)                   |
| <b>Здоровец М.</b>       | к.ф.-м.н.(Казахстан)              |
| <b>Кадыржанов К.К.</b>   | д.ф.-м.н., проф. (Казахстан)      |
| <b>Кайнарбай А.Ж.</b>    | к.ф.-м.н. (Казахстан)             |
| <b>Кутербеков К.А.</b>   | доктор ф.-м.н., проф. (Казахстан) |
| <b>Лущик А.Ч.</b>        | д.ф.-м.н., проф. (Эстония)        |
| <b>Морзабаев А.К.</b>    | д.ф.-м.н. (Казахстан)             |
| <b>Мырзакулов Р.К.</b>   | д.ф.-м.н., проф. (Казахстан)      |
| <b>Нурахметов Т.Н.</b>   | д.ф.-м.н., проф. (Казахстан)      |
| <b>Сауытбеков С.С.</b>   | д.ф.-м.н., проф. (Казахстан)      |
| <b>Салиходжа Ж.М</b>     | к.ф.-м.н. (Казахстан)             |
| <b>Тлеукунов С.К.</b>    | д.ф.-м.н., проф. (Казахстан)      |
| <b>Усеинов А.Б.</b>      | PhD (Казахстан)                   |
| <b>Хоши М.</b>           | PhD, проф. (Япония)               |

*Адрес редакции:* 010008, Казахстан, г. Нур-Султан, ул. Сатпаева, 2, каб. 402, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева.  
Тел.: (7172) 709-500 (вн. 31-428)  
E-mail: vest\_phys@enu.kz

*Ответственный секретарь, компьютерная верстка:* А. Нурболат

**Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева.**  
**Серия ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ**

Собственник РГП на ПХВ "Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева" МОН РК  
Периодичность: 4 раза в год

Зарегистрирован Министерством информации и коммуникаций Республики Казахстан.

Регистрационное свидетельство №16999-ж от 27.03.2018г.

Электронная версия в открытом доступе: <http://bulphysast.enu.kz/>

Адрес типографии: 010008, Казахстан, г. Нур-Султан, ул. Кажимукана, 12/1, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева. тел.: +7(7172)709-500 (вн. 31-428)

Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ  
ХАБАРШЫСЫ. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ сериясы

№4(129)/2019

МАЗМҰНЫ

|  |     |
|--|-----|
| <i>Ибраева А.Д., Янсе А. Вуурен Ван, Скуратов В.А., Здоровец М.В.</i> Кристалды Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -те латентті тректердің пайда болу энергиясының ионизациялық жоғалтуының шекті деңгейін анықтау   | 8   |
| <i>Алдонгаров А.А., Асылбекова А.М., Иргибаетова И.С.</i> Кумарин бояғышымен байланысты CdS кластерлерінде электрондық ауысуларды есептеу  | 15  |
| <i>Ермекова Ж.К., Алдонгаров А.А., Сағындықова Ғ.Е., Есманова С.С.</i> Педагогикалық мамандық студенттерінің сыни ойлауын дамыту   | 27  |
| <i>Карипбаев Ж.Т., Абуова А.У., Алтысова Г.К., Сәрсенғалиева К.М., Байжолов К.А., Кукенова А.Б., Здоровец М.В.</i> Оттегі енгізілген ZnWO <sub>4</sub> кристалдарының люминесценциясы  | 33  |
| <i>Кабышев А.М., Кутербеков К.А., Мұхамбетжан А.М., Нуржанов А.Б., Уәлшерев Д.Т., Бекмырза К.Ж., Рахимғалиева И.Т., Сарсенов Р.М., Махамбаева И.У.</i> 8-217 МэВ энергиясы кезінде <sup>28</sup> Si ядросында <sup>3</sup> He серпімді шашырауын зерттеу | 42  |
| <i>Мусаханов Д.А., Лисицын В.М., Карипбаев Ж.Т., Алтысова Г.К., Голковский М.Г., Даулетбекова А.К., Козловский А., Здоровец М.В.</i> Қуатты электронды ағынында синтезделген MgF <sub>2</sub> -WO <sub>2</sub> керамикасының құрылымы                    | 51  |
| <i>Каргин Д., Козловский А., Алтынов Е., Касымханов, А.Бисекен, Мухамбетов Д.</i> Болат илемдеу өндірісінің қосалқы өнімдер бөлшектерінің морфологиясы   | 59  |
| <i>Мусатаева А.Б., Мырзақулов Н.А.</i> Камасс-Холм теңдеуі үшін беттің бірінші және екінші фундаменталды формасы   | 65  |
| <i>Серикбаев Н.С., Нугманова Г.Н., Мырзақулов Р.</i> (2+1)-өлшемді Дэви-Стюартсон I теңдеуінің екікомпонентті жалпылануы I   | 73  |
| <i>Ногай А.С., Кутербеков К.А., Ускенбаев Д.Е., Бекмырза К.Ж., Ногай А.А., Кабышев А.М.</i> Платинасыз катализаторлары бар нафион типті мембраналардағы жылу релаксациялық поляризациясының ерекшеліктері  | 80  |
| <i>Нурсултанова Н.С., Жумадилов К.Ш.</i> Төмен доза әсер ету ықпалын бағалау мәселесі  | 86  |
| <i>Шанина З.К.</i> Конно-Оно теңдеуінің дисперсиясыз шегі  | 93  |
| <i>Шаханова Г.А.</i> Ақыл-ой карталарын оқу үдерісінде идеяларды қалыптастыру және құрылымдау әдісі ретінде қолдану  | 99  |
| <i>Русақова А.В., Акилбеков А.Т., Жунусова М.К.</i> Нейтрондармен сәулеленген GaAs диэлектрлік қасиеттерін күйдіру   | 107 |

BULLETIN OF L.N. GUMILYOV EURASIAN NATIONAL UNIVERSITY. PHYSICS.  
ASTRONOMY SERIES

№4(129)/2019

CONTENTS

|  |     |
|--|-----|
| <i>Ibrayeva A.D., Janse A. Vuuren Van, Skuratov V.A., Zdorovets M.V.</i> About determination of the threshold ionization energy losses for the latent tracks formation in crystalline $\text{Si}_3\text{N}_4$  | 8   |
| <i>Aldongarov A.A., Assilbekova A.M., Irgibaeva I.S.</i> Calculation of electronic transitions in CdS clusters associated with coumarin dye  | 15  |
| <i>Ermekova Zh.K., Aldongarov A.A., Sagyndykova G.E., Esmanova S.S.</i> Development of critical thinking of students of pedagogical specialties  | 27  |
| <i>Karipbaev Zh.T., Abuova A.U. Alpyssova G.K., Sarsengalieva K.M., Baozholov K.A., Kukenova A.B., Zdorovets M.V.</i> Luminescence of $\text{ZnWO}_4$ crystals with oxygen introduced  | 33  |
| <i>Kabyshv A.M., Kuterbekov K.A., Mukhambetzhana A.M., Nurzhanov A.B., Ualsherov D.T., Bekmyrza K.Zh., Rakhimgaliyeva I.T., Sarsenov R.M., Makhambayeva .U.</i> Study of the elastic scattering of $^3\text{He}$ on the $^{28}\text{Si}$ nucleus at the energy of 8 -217 MeV | 42  |
| <i>Musahanov D., Lisitsyn V., Karipbaev Zh., Alpyssova G., Golkovskii M., Dauletbekova A., Kozlovskii A., Zdorovec M.</i> The structure of $\text{MgF}_2\text{-WO}_2$ ceramic synthesized in a powerful electron flow  | 51  |
| <i>Kargin D., Kozlovskij A., Altynov E., Kasymhanov Zh., Biseken A., Muhambetov D.</i> Morphology of the particles of by-products of steel rolling production  | 59  |
| <i>Mussatayeva A.B., Myrzakulov N.A.</i> The first and second fundamental forms for the Camassa-Holm equation  | 65  |
| <i>Serikbayev N.S., Nugmanova G.N., Myrzakulov R.</i> On the Integrable Two-Component (2+1)-dimensional Davey-Stewartson Equation  | 73  |
| <i>Nogay A.S., Kuterbekov K.A., Uskenbayev D.E., Bekmyrza K.Zh., Nogay A.A., Kabyshv A.M.</i> Features of thermal relaxation of polarization in the Nafion membranes with no platinum catalysts  | 80  |
| <i>Nursultanova N., Zhumadilov K.</i> The problem of assessing the effects of low-dose exposure  | 86  |
| <i>Shanina Z.K.</i> Dispersionless limit of the Konno-Oono equation  | 93  |
| <i>Shakhanova G.A.</i> Mind maps as a method of generating and structuring ideas in the learning process   | 99  |
| <i>Russakova A.V., Akilbekov A.T., Zhunusova M.K.</i> Annealing of dielectric properties of GaAs Crystals Irradiated by Neutrons   | 107 |

ВЕСТНИК ЕВРАЗИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИМЕНИ Л.Н.ГУМИЛЕВА. Серия ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ

№4(129)/2019

СОДЕРЖАНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| <i>Ибраева А.Д., Янсе А. Вуурен Ван., Скуратов В.А., Здоровец М.В.</i> К вопросу об определении порогового уровня ионизационных потерь энергии образования латентных треков в кристаллическом $\text{Si}_3\text{N}_4$                            | 8   |
| <i>Алдонгаров А.А., Асылбекова А.М., Иргибаетова И.С.</i> Расчет электронных переходов в кластерах CdS, связанных с кумариновым красителем   | 15  |
| <i>Ермекова Ж.К., Алдонгаров А.А., Сагындыкова Г.Е., Есманова С.С.</i> Развитие критического мышления студентов педагогических специальностей  | 27  |
| <i>Карипбаев Ж.Т., Абуова А.У., Алтысова Г.К., Сарсенгалиева К.М., Байжолов К.А., Кукенова А.Б., Здоровец М.В.</i> Люминесценция кристаллов $\text{ZnWO}_4$ с введенным кислородом   | 33  |
| <i>Кабышев А.М., Кутербекоев К.А., Мухамбетжан А.М., Нуржанов А.Б., Уалшерев Д.Т., Бекмырза К.Ж., Рахимгалиева И.Т., Сарсенов Р.М., Махамбаева И.У.</i> Изучение упругого рассеяния $^3\text{He}$ на ядре $^{28}\text{Si}$ при энергии 8-217 МэВ | 42  |
| <i>Мусаханов Д.А., Лисицын В.М., Карипбаев Ж.Т., Алтысова Г.К., Голковский М.Г., Даулетбекова А.К., Козловский А., Здоровец М.В.</i> Структура керамики $\text{MgF}_2\text{-WO}_2$ , синтезированной в мощном потоке электронов                  | 51  |
| <i>Каргин Д., Козловский А., Алтынов Е., Касымханов, А.Бисекен, Д.Мухамбетов</i> Морфология частиц побочных продуктов сталепрокатного производства   | 59  |
| <i>Мусатаева А.Б., Мырзакулов Н.А.</i> Первая и вторая фундаментальные формы поверхности для уравнения Камасса-Холма   | 65  |
| <i>Серикбаев Н.С., Нугманова Г.Н., Мырзакулов Р.</i> О двухкомпонентном обобщении (2+1)-мерного уравнения Дэви-Стюартсона I  | 73  |
| <i>Ногай А.С., Кутербекоев К.А., Ускенбаев Д.Е., Бекмырза К.Ж., Ногай А.А., Кабышев А.М.</i> Особенности тепловой релаксационной поляризации в мембранах типа нафион с без платиновыми катализаторами  | 80  |
| <i>Нурсултанова Н.С., Жумадилов К.Ш.</i> Проблема оценки последствий воздействия низкой дозы облучения   | 86  |
| <i>Шанина З.К.</i> Бездисперсионный предел уравнения Конно-Оно   | 93  |
| <i>Шаханова Г.А.</i> Интеллект-карты как метод генерации и структурирования идей в учебном процессе  | 99  |
| <i>Русакова А.В., Акилбеков А.Т., Жунусова М.К.</i> Отжиг диэлектрических свойств GaAs, компенсированного облучением нейтронами  | 107 |

# ФИЗИКА



МРНТИ 29.15.01

**А.Д.Ибраева<sup>1</sup>, А.Янсе Ван Вуурен<sup>2</sup>, В.А.Скуратов<sup>3</sup>, М.В.Здоровец<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

<sup>1,4</sup> Астанинский филиал Института ядерной физики, Нур-Султан, Казахстан

<sup>2</sup> Центр высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии Университета им. Н. Манделы, Порт-Элизабет, ЮАР

<sup>3</sup> Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

(E-mail: <sup>1</sup> a.d.ibrayeva@gmail.com, <sup>2</sup> arnojvv@gmail.com, <sup>3</sup> skuratov@jinr.ru,

<sup>4</sup> mzdorovets@gmail.com)

## **К вопросу об определении порогового уровня ионизационных потерь энергии образования латентных треков в кристаллическом $\text{Si}_3\text{N}_4$**

**Аннотация:** Настоящая работа посвящена определению порогового уровня ионизационных потерь энергии образования латентных треков  $S_{et}$  в поликристаллическом нитриде кремния на основе анализа данных по радиационно-стимулированной аморфизации материала. Образцы  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (Al) были облучены ионами Хе с энергиями 167 МэВ и 220 МэВ высокой плотности ( $6 \times 10^{14}$  и  $2 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup> соответственно). На основе ПЭМ анализа структуры этих образцов в геометрии поперечного сечения определена нижняя граница  $S_{et}$  на уровне  $\sim 6,7$  кэВ/нм.

**Ключевые слова:** нитрид кремния, быстрые тяжелые ионы, латентные треки, аморфизация, ПЭМ.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-68-36-2019-129-4-8-14>

**Введение.** Утилизация отработанного ядерного топлива и радиоактивных отходов напрямую связана с уменьшением количества минорных актинидов в их составе. Перспективным способом безопасной и экономически выгодной переработки плутония и других актинидов является их повторное использование в качестве делящихся материалов нового топлива, заключенных в так называемые инертные матрицы, в результате чего ограничивается или полностью предотвращается образование новых актинидов. Среди кандидатных материалов инертных матриц особое внимание уделяется сложным керамикам, таким как  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , благодаря их высокой температуре плавления и низкому сечению поглощения тепловых нейтронов [1-3]. Однако следует учесть, что радиационная стабильность таких материалов, помимо нейтронного воздействия, в значительной мере зависит от повреждений, создаваемых осколками деления актинидов [4,5]. Подобное воздействие может быть смоделировано только с использованием тяжелых ионов высоких энергий ( $E \sim 1$  МэВ/нуклон) и остается наименее изученным по сравнению с другими видами ядерных излучений. Принимая во внимание актуальность данной задачи для энергетического сектора, требуется изучение микроструктурного отклика  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в условиях высоких скоростей дефектообразования и высокой плотности ионизации, характерных только для данных частиц.

Известно, что радиационные повреждения, вызываемые быстрыми тяжелыми ионами, ассоциируются с латентными треками, формирование которых происходит при превышении некоторого порогового значения удельных ионизационных потерь энергии. Кроме этого, необходимо отметить, что порог образования треков  $S_{et}$  и их размер  $R_{tr}$



являются единственными экспериментально определяемыми «входными параметрами» для верификации теоретических моделей трекообразования. Поэтому определению значения  $S_{et}$  уделяется повышенное внимание. Наиболее распространенный вариант оценки  $S_{et}$  основывается на установлении зависимости  $R_{tr}$  от уровня электронного торможения  $S_e$  с использованием доступных экспериментальных методик и расчетных данных (см., например, [6]). Единственным прямым экспериментальным методом определения  $S_{et}$  является просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), позволяющая установить глубину слоя облученного материала, до которой регистрируются треки, и соотнести ее со значением  $S_e$  на профиле удельных ионизационных потерь энергии. Такой метод использовался, в частности, для определения порогового значения  $S_{et}$  в монокристаллах  $Al_2O_3$  [7]. Однако следует учесть, что данный подход справедлив для анализа, главным образом, непрерывных треков и не позволяет надежно определить нижнюю границу ионизационных потерь энергии, соответствующую образованию прерывистых треков. Подобное ограничение связано с невозможностью оценки размеров прерывистых треков методом ПЭМ в силу их крайне малого размера (долей нанометра), что не позволяет получить уровень контраста, необходимый для качественного анализа микроскопических снимков. По этой причине найти величину  $S_{et}$  предлагается с использованием подхода, основанного на определении толщины слоя, аморфизованного в результате многократного перекрытия трековых областей в [8]. Поскольку данный метод предполагает облучение до относительно высоких ионных флюенсов, он, очевидно, может быть использован только для определения нижней границы  $S_{et}$ , ввиду необходимости учета вклада в аморфизацию радиационных повреждений, формируемых по каналу упругого рассеяния.

Первые данные по оценке порога образования треков в кристаллическом нитриде кремния с использованием ПЭМ и расчетных методов представлены в работах [5,9], согласно которым значение  $S_{et}$  находится на уровне  $\sim 15$  кэВ/нм. Целью настоящей работы является определение нижней границы порогового уровня электронного торможения для формирования треков в поликристаллическом нитриде кремния ( $p-Si_3N_4$ ) по радиационно-стимулированной аморфизации мишеней, облученных высокоэнергетическими ионами криптона и ксенона.

**Материалы и методы.** Исходные образцы нитрида кремния представляли собой поликристаллы  $Si_3N_4$  с примесью Al производства MTI Corporation (<http://www.mtixtl.com>), размер зерна которых варьировался от нескольких сотен нанометров до 2 микрон (рис.1).

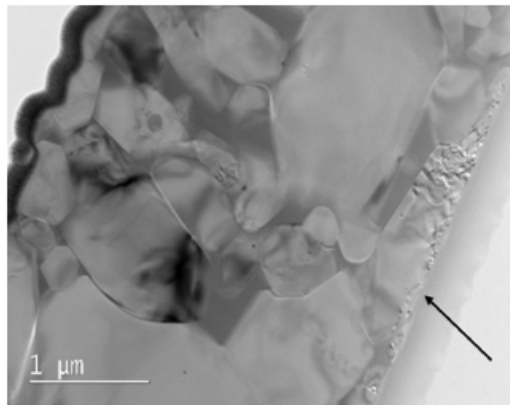


Рисунок 1. ПЭМ снимок поперечного сечения исходного поликристаллического образца  $Si_3N_4$ . Стрелкой отмечена поверхность кристалла

Облучение образцов ионами Хе с энергиями 167 МэВ и 220 МэВ проводилось при комнатной температуре на циклотронных комплексах ИЦ-100 (Дубна, Россия) и ДЦ-60 (Нур-Султан, Казахстан) соответственно. Подробная информация о параметрах облучения представлена в таблице 1. Однородное распределение (с точностью не хуже 10%) ионного пучка по облучаемой поверхности образца достигалось за счет сканирования в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Таблица 1. Основные параметры экспериментов по облучению поликристаллического  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .  $S_{es}$  – удельные потери энергии на ионизацию на поверхности мишени.

| Ион               | Энергия, МэВ | $S_{es}$ , кэВ/нм | Температура мишени, К | Флюенс, $\text{см}^{-2}$                   |
|-------------------|--------------|-------------------|-----------------------|--|
| $^{132}\text{Xe}$ | 167          | 20,8              | 300                   | $1 \times 10^{12}$ ,<br>$6 \times 10^{14}$ |
|                   | 220          | 21,9              | 300                   | $2 \times 10^{14}$                         |

Электронно-микроскопический анализ проводился в Центре высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии университета Нельсона Манделы, Порт Элизабет, ЮАР. ПЭМ-ламели, ориентированные перпендикулярно облученной поверхности, были подготовлены методом фокусированного ионного пучка (ФИП) с использованием установки FEI Helios Nanolab 650. Для минимизации повреждений, вызываемых ионным пучком, при приготовлении образцов использовалась энергия ионов до 500 В. Исследование микроструктуры образцов проводилось с помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения JEOL ARM200F с Cs коррекцией при 200 кВ.

**Результаты и обсуждение.** В образце нитрида кремния, облученном ионами ксенона с энергией 167 МэВ, были зарегистрированы латентные треки с прерывистой структурой (рис. 2). Как уже было отмечено, такая морфология структурных нарушений в сочетании с их малым диаметром не позволяет надежно определить диаметр трека, что значительно усложняет задачу нахождения порогового значения  $S_{et}$ . В частности, это исключает точное установление глубины слоя, в котором наблюдаются единичные неперекрывающиеся треки, и соответствующего этой глубине уровня электронного торможения на профиле потерь энергии, который и является пороговым значением.

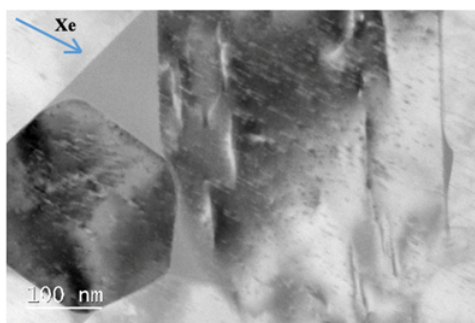


Рис. 2. Светлопольный “cross-section” снимок  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , облученного ионами ксенона с энергией 167 МэВ при комнатной температуре. Флюенс  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

Как было сказано выше, перекрытие трековых областей может привести к аморфизации материала, и в этом случае толщина аморфизованного слоя также может быть использована для косвенного определения величины  $S_{et}$ . Ионный флюенс  $\Phi$ , начиная с которого треки полностью перекрываются, определяется из условия  $\Phi \times \pi R^2 = 1$ , где  $R$  – радиус трека. В это случае даже при радиусе 0,5 нм перекрытие должно наблюдаться при флюенсе  $1,5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . При облучении ионами Хе с энергией 220 МэВ  $R = 1 \pm 0,1$  [10], что дает значение флюенса перекрытия треков  $\sim 1,3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Следовательно, облучение до флюенса порядка  $10^{14} \text{ см}^{-2}$  должно привести к полной аморфизации облученного слоя мишени, что подтверждается данными ПЭМ. Получено, что облучение ионами Хе с энергией 167 МэВ приводит к образованию аморфного слоя толщиной около 10,5 мкм (рис. 3) при проективном пробеге ионов  $R_p = 15$  мкм. Увеличение энергии налетающих ионов до 220 МэВ приводит к увеличению толщины аморфизованного слоя до 12,7 мкм, а величины пробега до 18 мкм (рис.4). В этом случае согласно расчетам с использованием программного пакета SRIM-2013, глубине 10,5 мкм для 167 МэВ Хе соответствует  $S_{et} = 5,9$  кэВ/нм, а 12,7 мкм для 220 МэВ соответствует значение  $S_{et} = 6,7$  кэВ/нм. Следует отметить, что при проведении расчетов использовалось значение плотности, соответствующее аморфному материалу,  $\rho = 3 \text{ г/см}^3 = 9,014 \text{ атомов/см}^3$  [11] и значение пороговой энергии смещения атомов 40 эВ и для Si, и для N, как предложено в работе [12].

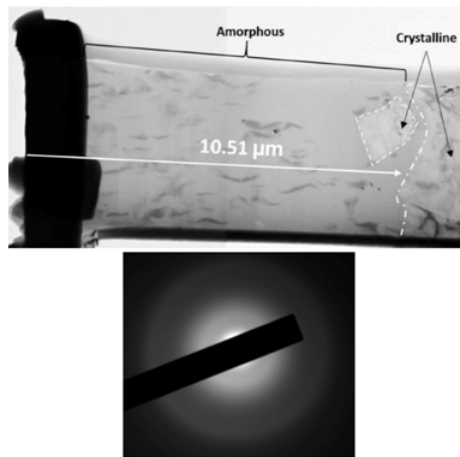


Рис.3 Светлопольный “cross-section” снимок поликристаллического  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (ламеллы), облученного ионами ксенона с энергией 167 МэВ при комнатной температуре. Флюенс  $6 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Снизу представлено изображение SAD аморфизованной области

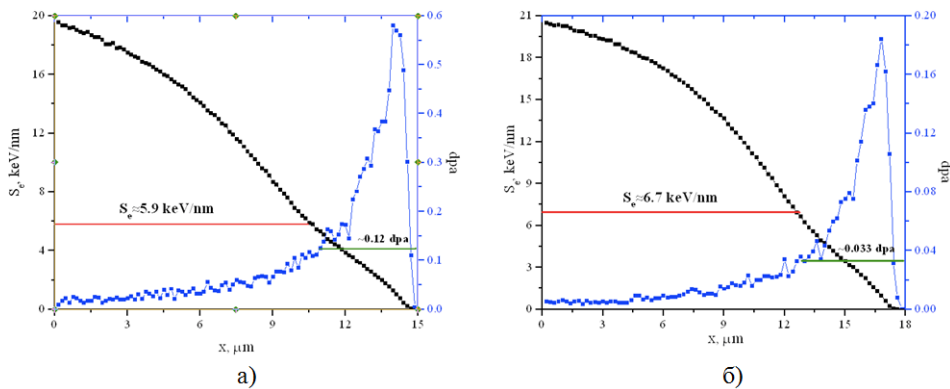


Рис.4. Профиль удельных ионизационных потерь энергии для  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при облучении ионами ксенона с энергиями: а) 167 МэВ ( $6 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ); б) 220 МэВ ( $2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ )

Очевидно, что полученные значения порогового уровня ионизационных потерь энергии для ионов ксенона с энергиями 167 и 220 МэВ несколько различаются. Явным фактором, способным повлиять на процессы аморфизации является вклад радиационных дефектов, образованных по каналу упругих столкновений, поскольку значения электронных потерь находятся на одном уровне  $\sim 21 \text{ кэВ/нм}$  (см. табл.1 и рис.4). В то же время доза повреждений равна  $\sim 0,12 \text{ сна}$  на глубине 10,5 мкм (рис. 5а),  $\sim 0,03 \text{ сна}$  на глубине 12,7 мкм (рис. 5б) для ксенона с энергиями 167 и 220 МэВ соответственно. Следовательно, большее значение  $S_{et}$  для ионов ксенона с энергией 220 МэВ является следствием меньшего уровня повреждений, поскольку образцы в этом случае были облучены до флюенса  $2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (см. таблицу 1). Таким образом, нижняя граница порогового значения образования треков  $\sim 6,7 \text{ кэВ/нм}$  была определена на основе данных аморфизации поликристаллического  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , облученного ионами ксенона.

Следует отметить, что на радиационно-стимулированную аморфизацию нитрида кремния может повлиять также присутствие в материале примесей металлов, таких как Cr, Ti, Ni, Si [13]. К сожалению, в литературе нет данных о влиянии Al на процессы аморфизации  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , однако можно предположить, что его присутствие, так же, как и других металлов, может несколько ускорить переход облучаемого материала в аморфное состояние. Таким образом, для чистого нитрида кремния данное пороговое значение может быть сдвинуто в сторону больших значений.

**Заключение.** Настоящая работа посвящена определению нижней границы порогового значения ионизационных потерь энергии, достаточных для образования дефектов в поликристаллическом нитриде кремния. Результаты экспериментов облучения ионами ксенона с энергиями 167 МэВ и 220 МэВ высокой плотности позволили установить минимальное  $S_{et}$  на уровне  $\sim 6,7 \text{ кэВ}$ . Присутствие в исследованных образцах примеси алюминия может

повлиять на скорость радиационно-индуцированной аморфизации, предположительно, в сторону увеличения. Следовательно, для чистого  $\text{Si}_3\text{N}_4$  значение  $S_{et}$  может быть несколько больше, как было показано в работе [5].

### Список литературы

- 1 Riley F. L. Silicon nitride and related materials // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2000. – Т. 83. №. 2. – С. 245-265. doi: 10.1111/j.1151-2916.2000.tb01182.x
- 2 Akiyoshi M., Akasaka N., Tachi Y., Yano T. Interstitial atom behavior in neutron-irradiated beta-silicon nitride // *Journal of the Ceramic Society of Japan, Supplement Journal of the Ceramic Society of Japan, Supplement 112-1, PacRim5 Special Issue*. – 2004. – С. S1490-S1494. doi: 10.14852/jcersjsuppl.112.0.S1490.0
- 3 Yano T., Akiyoshi M., Ichikawa K., Tachi Y., Iseki T. Physical property change of heavily neutron-irradiated  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and SiC by thermal annealing // *Journal of nuclear materials*. – 2001. – Т. 289. №. 1-2. – С. 102-109. doi: 10.1016/S0022-3115(00)00688-7
- 4 Matzke H., Rondinella V. V., Wiss T. Materials research on inert matrices: a screening study // *Journal of Nuclear Materials*. – 1999. – Т. 274. №. 1-2. – С. 47-53. doi: 10.1016/S0022-3115(99)00062-8
- 5 Zinkle S. J., Skuratov V. A., Hoelzer D. T. On the conflicting roles of ionizing radiation in ceramics // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2002. – Т. 191. №. 1-4. – С. 758-766. doi: 10.1016/S0168-583X(02)00648-1
- 6 Khalfaoui N., Stoquert J.P., Haas F., Traumann C., Meftah A., Toulemonde M. Damage creation threshold of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  under swift heavy ion irradiation // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2012. – Т. 286. – С. 247-253. doi: 10.1016/j.nimb.2011.11.047
- 7 Skuratov V.A., O'Connell J., Kirilkin N.S., Neethling J. On the threshold of damage formation in aluminum oxide via electronic excitations // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2014. – Т. 326. – С. 223-227. doi: 10.1016/j.nimb.2013.10.037
- 8 Szenes G. Ion-induced amorphization in ceramic materials // *Journal of Nuclear Materials*. – 2005.- Т. 336. – С.81-89. doi: 10.1016/j.jnucmat.2004.09.004
- 9 Ibrayeva A.D., Janse van Vuuren A., O'Connell J.H., Skuratov V.A., Zdorovets M.V. Applicability of the i-TS model to evaluation of latent track parameters in silicon nitride // *Abstracts of the 20th International Conference Radiation Effects in Insulators, Nur-Sultan, Kazakhstan, 2019*. – Нұр-Сұлтан, 2019. – С. 157.
- 10 Ibrayeva A.D., Janse van Vuuren A., O'Connell J., Skuratov V.A., Mutali A. iTS Model-Based Analysis of Track Formation in Crystalline and Amorphous Silicon Nitride // *Proceedings of the 13th International Conference on the Interaction of Radiation with Solids, Minsk, Belarus, 2019*. – Минск, 2019. – С. 97-99.
- 11 Kitayama T., Morita Y., Nakajima K., Narumi K., Saitoh Y., Matsuda M., Sataka M., Tsujimoto M., Isoda S., Toulemonde M. Formation of ion tracks in amorphous silicon nitride films with MeV C60 ions // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2015. – Т. 356. – С. 22-27. doi: 10.1016/j.nimb.2015.04.051
- 12 Zinkle S. J., Kinoshita C. Defect production in ceramics // *Journal of Nuclear Materials*. – 1997. – Т. 251. – С. 200-217. doi: 10.1016/s0022-3115(97)00224-9
- 13 Zinkle S.J., Snead L.L., Eatherly W. S., Jones J.W., Hensley D.K. Effect of Low Temperature Ion Irradiation on the Microstructure of Nitride Ceramics // *MRS Online Proceeding Library Archive*. – 1999. – Т. 540. – С. 305-310. doi: 10.1557/PROC-540-305

А.Д. Ибраева<sup>1</sup>, А. Янсе ван Вуурен<sup>2</sup>, В.А. Скуратов<sup>3</sup>, М.В. Здоровец<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

<sup>1,4</sup> Астаналық ядролық физика институтының филиалы, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

<sup>2</sup> Н. Мандела атындағы Университеттің жарық өткізгіштігі жоғары электрондық микроскопия орталығы, Порт-Элизабет, ОАР

<sup>3</sup> Біріккен Ядролық Зерттеулер Институтының Г.Н. Флеров атындағы ядролық реакциялар лабораториясы, Дубна, Ресей

**Кристалды  $\text{Si}_3\text{N}_4$  -те латентті тректердің пайда болу энергиясының ионизациялық жоғалтуының шекті деңгейін анықтау**

**Аңдатпа:** Берілген жұмыс материалдың радиациялық-ынталандырылған аморфизациясы бойынша деректерді талдау негізінде кремнийдің поликристалды нитридінде  $S_{et}$  латентті тректерінің пайда болу энергиясының ионизациялық ысырабының мәнін анықтауға арналған. Үлгілер  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (Al) 167 МэВ энергиясымен және 220 МэВ жоғары тығыздығымен Хе ионымен сәулеленген ( $6 \times 10^{14}$  и  $2 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>, сәйкесінше). Көлденең қима геометриясында осы үлгілердің құрылымын талдау ПЭМ негізінде төменгі шекарасы  $S_{et} \sim 6,7$  кэВ/нм деңгейінде анықталды.

**Түйін сөздер:** кремний нитридi, жылдам ауыр иондар, латентті тректер, аморфизация, жарық түсіретін электрондық микроскопия (ЖЭМ).

A.D. Ibrayeva<sup>1</sup>, A. Janse van Vuuren<sup>2</sup>, V.A. Skuratov<sup>3</sup>, M.V. Zdorovets<sup>4</sup>

<sup>1</sup> L.N.Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

<sup>1,4</sup> The Institute of Nuclear Physics' Astana branch, Nur-Sultan, Kazakhstan

<sup>2</sup> Centre for High Resolution Transmission Electron Microscopy of N. Mandela University, Port Elizabeth, South Africa

<sup>3</sup> G.N. Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

**About determination of the threshold ionization energy losses for the latent tracks formation in crystalline Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>**

**Abstract:** This work is devoted to determine the threshold value of ionization energy loss  $S_{et}$  for formation of latent tracks in polycrystalline silicon nitride based on the analysis of radiation-stimulated amorphization of material. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Al) specimens were irradiated with 167 MeV and 220 MeV Xe ions with high fluencies ( $6 \times 10^{14}$  and  $2 \times 10^{14}$  cm<sup>-2</sup>, respectively). According to cross-section TEM analysis of sample structures the lower boundary of  $S_{et}$  has been found at level ~6.7 keV/nm.

**Keywords:** silicon nitride, swift heavy ions, latent tracks, amorphization, TEM.

## References

- 1 Riley F. L. Silicon nitride and related materials, Journal of the American Ceramic Society, **83**(2), 245-265 (2000).
- 2 Akiyoshi M., Akasaka N., Tachi Y., Yano T. Interstitial atom behavior in neutron-irradiated beta-silicon nitride, Journal of the Ceramic Society of Japan, Supplement Journal of the Ceramic Society of Japan, Supplement 112-1, PacRim5 Special Issue, S1490-S1494 (2004).
- 3 Yano T., Akiyoshi M., Ichikawa K., Tachi Y., Iseki T. Physical property change of heavily neutron-irradiated Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and SiC by thermal annealing., Journal of nuclear materials, **289**(1-2), 102-109 (2001).
- 4 Matzke H., Rondinella V. V., Wiss T. Materials research on inert matrices: a screening study, Journal of Nuclear Materials, **274**(1-2), 47-53 (1999).
- 5 Zinkle S. J., Skuratov V. A., Hoelzer D. T. On the conflicting roles of ionizing radiation in ceramics, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, **191**(1-4), 758-766 (2002).
- 6 Khalfaoui N., Stoquert J.P., Haas F., Traumann C., Meftah A., Toulemonde M. Damage creation threshold of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> under swift heavy ion irradiation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, **286**, 247-253 (2012).
- 7 Skuratov V.A., O'Connell J., Kirilkin N.S., Neethling J. On the threshold of damage formation in aluminum oxide via electronic excitations, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, **326**, 223-227 (2014).
- 8 Szenes G. Ion-induced amorphization in ceramic materials, Journal of Nuclear Materials, **336**(1), 81-89 (2005).
- 9 Ibrayeva A.D., Janse van Vuuren A., O'Connell J.H., Skuratov V.A., Zdorovets M.V. Applicability of the i-TS model to evaluation of latent track parameters in silicon nitride, Abstracts of the 20th International Conference Radiation Effects in Insulators. Nur-Sultan, 2019, p. 157.
- 10 Ibrayeva A.D., Janse van Vuuren A., O'Connell J., Skuratov V.A., Mutali A. iTS Model-Based Analysis of Track Formation in Crystalline and Amorphous Silicon Nitride, Proceedings of the 13th International Conference on the Interaction of Radiation with Solids. Minsk, 2019, pp. 97-99.
- 11 Kitayama T., Morita Y., Nakajima K., Narumi K., Saitoh Y., Matsuda M., Sataka M., Tsujimoto M., Isoda S., Toulemonde M. Formation of ion tracks in amorphous silicon nitride films with MeV C60 ions, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, **356**, 22-27 (2015).
- 12 Zinkle S. J., Kinoshita C. Defect production in ceramics, Journal of Nuclear Materials, **251**, 200-217 (1997).
- 13 Zinkle S.J., Snead L.L., Eatherly W. S., Jones J.W., Hensley D.K. Effect of Low Temperature Ion Irradiation on the Microstructure of Nitride Ceramics, MRS Online Proceeding Library Archive, **540**, 305-310 (1999).

### Сведения об авторах:

*Ибраева А.Д.* - докторант международной кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет, ул. Сатбаева, 2, Нур-Султан, Казахстан; инженер лаборатории физики твердого тела Астанинского филиала Института ядерной физики, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Янсе ван Вуурен А.* - исследователь-микроскопист Центра высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии, Университет имени Н. Манделы, ул. University Way, 124, Порт Элизабет, ЮАР.

*Скуратов В.А.* - начальник сектора Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, Объединенный институт ядерных реакций, ул. Жолио-Кюри, 6, Дубна, Россия.

*Здоровец М.В.* - директор Астанинского филиала Института ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Ibrayeva A.D.* - PhD student at the International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2, Satbayev str., Nur-Sultan, Kazakhstan; Engineer of the Laboratory of Solid State Physics of the Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics, 2/1, Ablai Khan Ave, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Janse van Vuuren A.* – Research Microscopist at the Center for High Resolution Transmission Electron Microscopy, N. Mandela University, 124, University Way, Port Elizabeth, South Africa.

*Skuratov V.A.* - Head of Sector of G.N. Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Reactions, 6, Joliot-Curie street, Dubna, Russia.

*Zdorovets M.V.* - Director of the Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics, 2/1, Ablai Khan Ave, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Поступила в редакцию 08.06.2019*