

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ**

**«Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ» КЕАҚ**

**Студенттер мен жас ғалымдардың  
«GYLYM JÁNE BILIM - 2024»  
XIX Халықаралық ғылыми конференциясының  
БАЯНДАМАЛАР ЖИНАҒЫ**

**СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ  
XIX Международной научной конференции  
студентов и молодых ученых  
«GYLYM JÁNE BILIM - 2024»**

**PROCEEDINGS  
of the XIX International Scientific Conference  
for students and young scholars  
«GYLYM JÁNE BILIM - 2024»**

**2024  
Астана**

**УДК 001**

**ББК 72**

**G99**

**«ǴYLYM JÁNE BILIM – 2024» студенттер мен жас ғалымдардың XIX Халықаралық ғылыми конференциясы = XIX Международная научная конференция студентов и молодых ученых «ǴYLYM JÁNE BILIM – 2024» = The XIX International Scientific Conference for students and young scholars «ǴYLYM JÁNE BILIM – 2024». – Астана: – 7478 б. - қазақша, орысша, ағылшынша.**

**ISBN 978-601-7697-07-5**

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 001**

**ББК 72**

**G99**

**ISBN 978-601-7697-07-5**

**©Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия  
ұлттық университеті, 2024**

Сонымен қатар, BluePhantomSMARTSCAN неғұрлым салмақты өлшемдері мен дәлдігімен ерекшеленеді.

Оны орнату, жұмыс істеу үшін үлкен энергия шығыны қажет, сәйкесінше бұл фантом Жаңа құрылғыны пайдалануға беру кезінде дозиметриялық өлшеулерде, сондай-ақ жылдық тексерулерде және сапаны бақылауда қолданылады. BluePhantomSMARTSCAN-ның үлкен артықшылығы-доза профилін алу мүмкіндігі және дозаны кеңістікте бөлу [3].

Бүгінгі таңда барлық радиологиялық сызықтық үдеткіштер үшін әмбебап сапа кепілдігі бағдарламасын жасау мүмкін емес. Іс жүзінде әрбір радиологиялық кешен үшін тест жүйесін әзірлеу маңызды. Су фантомы түріндегі жабдықта абсолютті дозиметрияны қолдану ең қолайлы, бұл мәселені шешуге және онкологиялық аурулары бар науқастарға медициналық көмектің жоғары деңгейін көрсетуге ықпал етеді [4].

### **Пайдаланылған әдебиеттер тізімі**

1. Титович, Е. В. Оптимизация программы гарантии качества облучения пациентов по методике IMRT / Е.В. Титович, И.Г. Тарутин, А.А. Жигун // Медицинская физика. 2014;4:14–21.
2. Тарутин, И. Г. Применение линейных ускорителей электронов в высокотехнологичной лучевой терапии / И.Г.Тарутин, Е.В. Титович. – Минск: Белорусская наука, 2014. – 176 с.
3. Herman M.G., Clinical use of electronic portal imaging: Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 58 / Michael G. Herman [et al.] // Medical Physics. 2001;1(2):38–57.
4. Herman M.G., Guide to clinical use of electronic portal imaging / Michael G. Herman [et al.] // Journal of Applied Clinical Medical Physics. 2000;1(2):38–57.
5. Klein EE. Task Group 142 report: Quality assurance of medical accelerators / Eric E. Klein [et al.] // Medical Physics. 2009;36:4197–4212.

УДК 537.622.4.

## **ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В AlN КЕРАМИКАХ ПРИ ВАРИАЦИИ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ИОНОВ**

**Бихерт Евгений Викторович**

[bihertevgenij@gmail.com](mailto:bihertevgenij@gmail.com)

постдокторант, старший преподаватель кафедры «Техническая физика» ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Даулетбекова А.К.

В свете последних тенденций в мире большое внимание уделяется разработкам альтернативных источников энергии, основной целью которых помимо решения ряда экологических проблем, является снижение зависимости энергетического сектора от углеводородов. Одной из ключевых концепций развития ядерной энергетики, связанной с увеличением мощности ядерно-энергетических установок является создание новых типов ядерных реакторов (высокотемпературных, реакторов на быстрых нейтронах, модульных реакторов), обладающих повышенным КПД выгорания ядерного топлива, а также высокой устойчивостью к накоплению радиационных повреждений в процессе эксплуатации и высоким уровнем безопасности [1,2]. В концепции реакторов нового поколения (Gen IV) для проектирования активной зоны, ключевых узлов ядерного реактора и топливных элементов в виде инертных матриц или же стенок ТВЭЛов большое внимание уделяется новым типам материалов: керамикам и высокоэнтропийным сплавам [3-5]. Для данных материалов критически важно понимание радиационной стойкости и сохранения стабильности основных параметров (теплопроводности, прочности, устойчивости к охрупчиванию) при длительном воздействии ионизирующего излучения. Это обусловлено тем, что в процессе эксплуатации

данных материалов следует учитывать режимы работы, при которых они будут сохранять стабильность, а также зная критические точки, при которых может возникнуть дестабилизация работы, найти пути их решения [6-8].

В данной работе описаны результаты исследования структурных, оптических и механических характеристик AlN керамик, подверженных воздействию облучения тяжелыми ионами  $\text{Xe}^{23+}$  при вариации флюенса облучения, а также плотности потока частиц. Керамики на основе нитрида алюминия (AlN), стабилизированные оксидом иттрия ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), обладают поликристаллической структурой с гексагонального типа кристаллической решетки (тип вюрцита) с параметрами  $a=3.1149 \text{ \AA}$ ,  $c=4.9820 \text{ \AA}$  и плотностью  $3.26 \text{ г/см}^3$ . Данный тип керамик является очень перспективным, в частности, в виде конструкционных материалов первой стенки реактора или альтернативного материала стенок твэлов.

Облучение образцов было проведено на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60, расположенного на базе Института ядерной физики в г. Астана, Казахстан. Для облучения были выбраны тяжелые ионы  $\text{Xe}^{23+}$  с энергий 230 МэВ ( $1.75 \text{ МэВ/нуклон}$ ). Флюенс облучения составил  $5 \times 10^{12} \text{ ион/см}^2$ , что в пересчете на величину атомных смещений составляет 0.0001 фра вдоль всей длины пробега ионов и 0.0004 сна в максимуме длины пробега, где доминируют ядерные потери налетающих ионов.

Для проверки гипотезы влияния плотности потока облучения на степень радиационных повреждений и последствий, вызванных ими облучение тяжелыми ионами проводилось при контроле тока пучка и его вариации в диапазоне от 15 нА до 45 нА. Плотности потока ионов составила  $4,2 \times 10^8 - 1,1 \times 10^9 \text{ ион/см}^2 \times \text{с}$ .

Согласно расчетам скорость атомных смещений составила  $3,4 \times 10^{-8} \text{ сна/с}$ ,  $6,6 \times 10^{-8} \text{ сна/с}$  и  $8,7 \times 10^{-8} \text{ сна/с}$  для токов ионного пучка 15 нА, 30 нА и 45 нА соответственно. Это позволяет сделать вывод о том, что увеличение тока ионного пучка с 15 нА до 45 нА приводит к увеличению скорости набора атомных смещений более чем в 2 раза. При этом увеличение скорости накопления атомных смещений может привести к изменениям в эволюции радиационных повреждений в приповерхностном слое за счет изменения скорости их образования.

Для оценки влияния вкладов ионизационных потерь налетающих ионов при взаимодействии с электронной и ядерной подсистемой приповерхностного слоя, а также определения максимальной глубины пробега был использован программный код SRIM Pro 2013. Моделирование было осуществлено с использованием модели Kinchin-Pease с учетом каскадных взаимодействий. Плотность образца составляет  $3.26 \text{ г/см}^3$ , displacement threshold energy (Ed) 19 эВ и 55 эВ для атомов N и Al. [9].

На рисунке 1 представлены результаты сравнительного анализа изменения дифракционных картин исследуемых образцов AlN керамик, подверженных облучению тяжелыми ионами  $\text{Xe}^{23+}$  с флюенсом облучения  $5 \times 10^{12}$  ион/см<sup>2</sup> при вариации тока пучка. Общий вид представленных дифрактограмм свидетельствует об отсутствии каких-либо

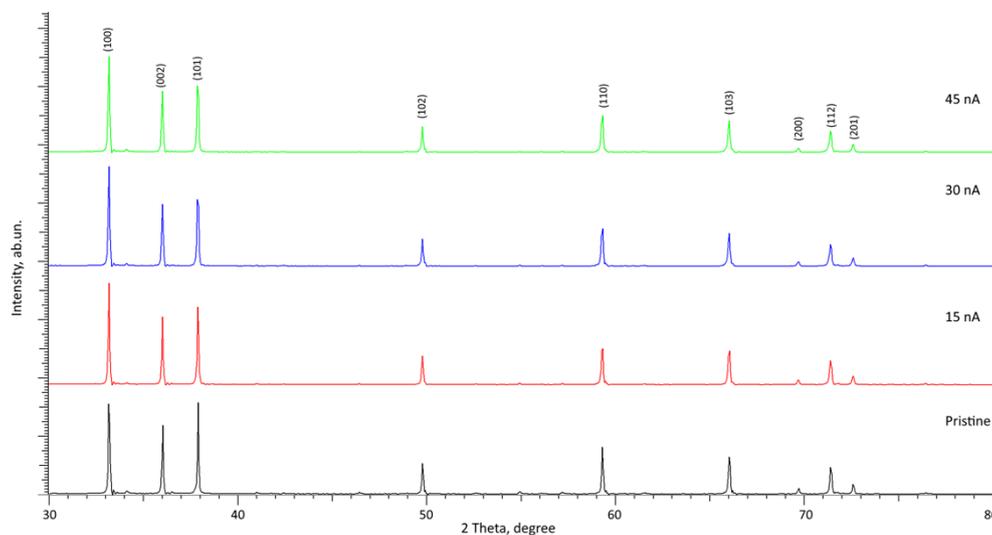


Рисунок 1. Результаты рентгеновской дифракции исследуемых образцов керамик в зависимости от тока ионного пучка в сравнении с данными рентгеновской дифракции образца в исходном состоянии.

изменений, связанных с появлением новых дифракционных пиков или же расслоению наблюдаемых рефлексов, что свидетельствует об отсутствии процессов полиморфных трансформаций в облученном слое, а также высокой устойчивости керамик к частичной аморфизации. Основные изменения на дифрактограммах облученных образцов в сравнении с исходным образцом выражаются в незначительном смещении дифракционных максимумов в малоугловую область  $2\theta^0$ , свидетельствующем о деформации кристаллической структуры в результате облучения, а также изменения соотношения интенсивностей для наиболее интенсивных дифракционных рефлексов (100), (002) и (101). Это свидетельствует об эффекте переориентации текстурных плоскостей в результате облучения, которое может быть обусловлено эффектами разной степени деформационных искажений, а также накопленной дефектной фракцией в поврежденном слое. При этом отсутствие новых дифракционных рефлексов или расслоение наблюдаемых рефлексов свидетельствует об отсутствии процессов фазовых или полиморфных превращений в составе керамик в результате облучения. Стоит отметить, что в случае керамик AlN, обладающих гексагональным типом кристаллической решетки, согласно ряду работ [10-12], облучение тяжелыми ионами не вызывает эффектов образования структурно-измененных областей в виде прерывистых или протяженных латентных треков, которые наблюдаются в нитриде кремния.

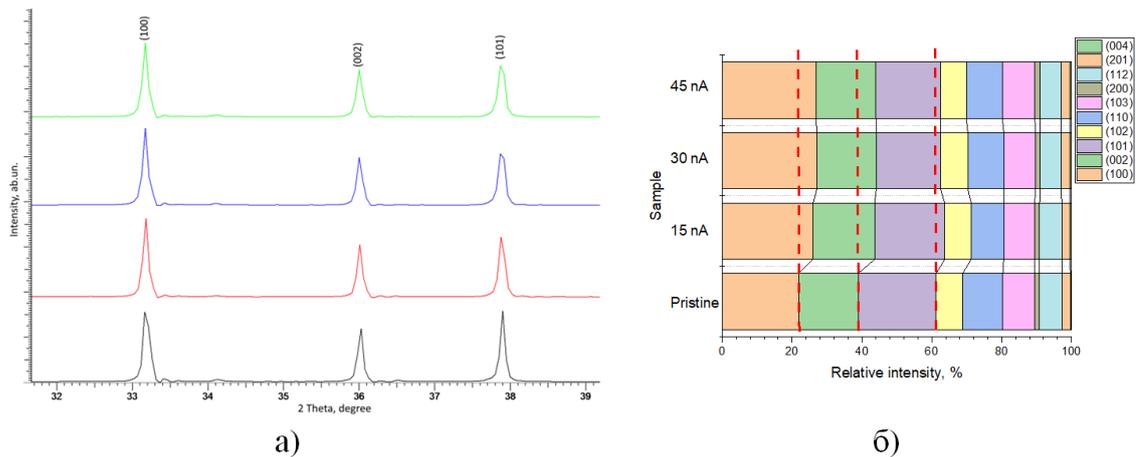


Рисунок 2. Данные рентгеновской дифракции

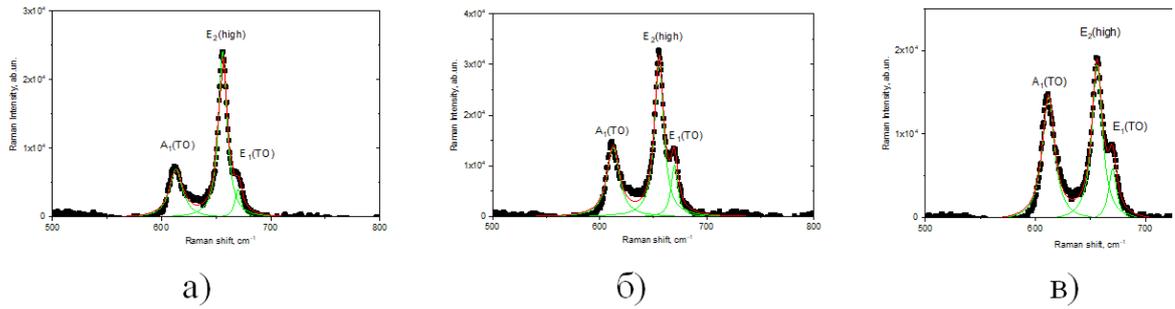
Рентгеновские дифрактограммы основных дифракционных рефлексов, отражающих изменения интенсивностей и формы основных дифракционных максимумов (100), (002) и (101); б) Результаты оценки вкладов интенсивностей дифракционных рефлексов, отражающие эффекты переориентации текстурных направлений в зависимости от типа внешнего воздействия (пунктирными красными линиями обозначены положение вкладов интенсивностей в случае необлученных керамик).

На рисунке 2а представлена динамика изменения трех наиболее выраженных дифракционных рефлексов (100), (002) и (101), изменение которых свидетельствует о структурном искажении кристаллической решетки вдоль осей а и с, а изменение интенсивностей свидетельствует о процессах текстурной переориентации в результате внешних воздействий. Как видно из представленных данных, увеличение тока ионного пучка приводит к возникновению эффекта переориентации основных дифракционных рефлексов, связанных с изменением их интенсивности, а также искажением формы дифракционных рефлексов, свидетельствующей о деформационном искажении, возникающем в результате накопления радиационных повреждений, в виде точечных и вакансионных дефектов. Смещение дифракционных рефлексов в область малых углов, а также искажение их формы, отчетливо различимое для рефлекса (100) и (101) свидетельствуют о возникновении в структуре поврежденного слоя, связанного с образованием деформационных растягивающих напряжений, вызванных облучением. При этом наиболее выраженные наблюдаемые изменения формы дифракционных рефлексов (100) и (101), свидетельствуют о возможном возникновении анизотропного искажения кристаллической решетки вдоль оси а.

На рисунке 2б в виде диаграммы представлены данные изменения вкладов текстурных коэффициентов наиболее выраженных дифракционных рефлексов. Достаточно четко видно влияние плотности тока ионного пучка на переориентацию текстурных направлений в сравнении с исходным образцом. Следует отметить, что увеличение плотности тока ионного пучка оказывает наибольшее влияние на текстурное направление (100), что свидетельствует о процессах переориентации в результате ионизационных процессов и образованию радиационных повреждений.

На рисунке 3 представлены результаты рамановских спектров AlN керамик, облученных тяжелыми ионами  $\text{Xe}^{23+}$  с различным током ионного пучка. Общий вид представленных рамановских спектров аналогичен спектру необлученных керамик, однако, в случае вариации тока ионного пучка наблюдается изменение интенсивностей и полуширин (FWHM) спектральных линий.

О деформационном характере структурных изменений, вызванных облучением свидетельствует изменение смещения спектральных линий (Raman shift). Как известно, спектральная линия  $E_2(\text{high})$  наиболее чувствительна к деформационным искажениям структуры в результате внешних воздействий [13]. Анализ наблюдаемых изменений показал,



а) 15 нА; б) 30 нА; в) 45 нА

Рисунок 4. Рамановские спектры AlN керамик после облучения тяжелыми ионами  $\text{Xe}^{23+}$  при вариации тока ионного пучка.

что при вариации плотности тока ионного пучка, наблюдается два типа характерных изменений в рамановских спектрах. Первый тип связан с изменением интенсивности и величины FWHM спектральных линий, который свидетельствует об эффекте структурного разупорядочения и аморфизации структуры. Второй тип изменений связан со смещением спектральных линий относительно максимума положения спектральных линий характерных для исходного образца. Данные смещения характеризуют наличие остаточных механических напряжений, возникающих в результате деформационных искажений при взаимодействии налетающих ионов с кристаллической структурой керамики, а знак «-» или «+» при расчете данной величины характеризует тип данных напряжений – сжимающий или растягивающий.

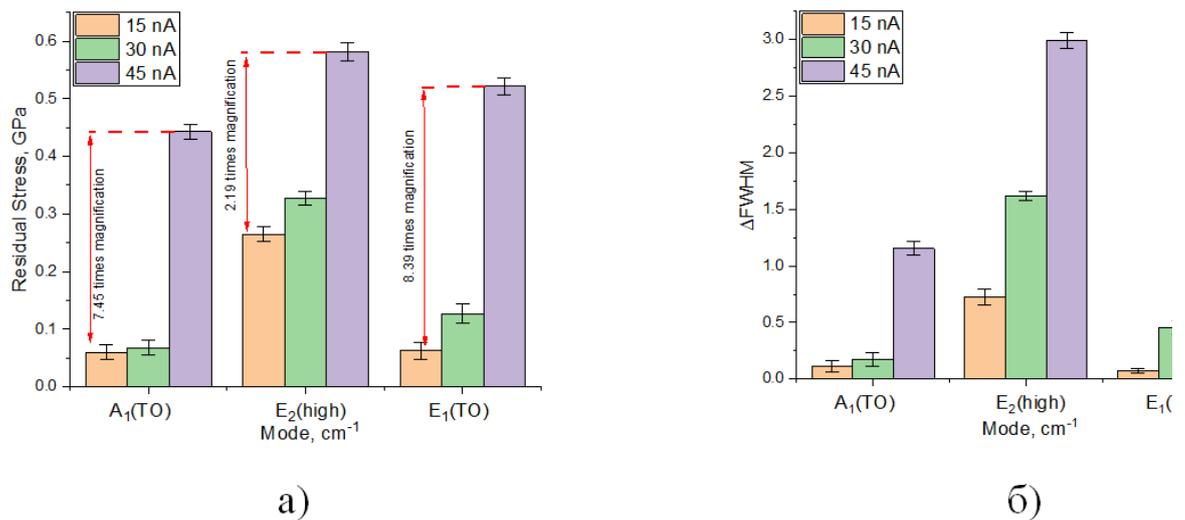


Рисунок 5. Результаты рамановской спектроскопии

а) Результаты оценки изменения величины остаточных механических напряжений в поврежденном слое керамик, определенных при помощи рамановской спектроскопии, в случае вариации условий облучения; б) Результаты изменения величины FWHM спектральных линий при вариации условий облучения.

На рисунке 5а представлены результаты оценки изменения величины остаточных механических напряжений  $\sigma_{xx}$  для трех спектральных линий  $A_1(\text{TO})$ ,  $E_2(\text{high})$  и  $E_1(\text{TO})$  в зависимости от типа внешнего воздействия. Общий вид представленных данных свидетельствует о существенном влиянии вариации плотности тока ионного пучка на смещение положений максимумов спектральных линий, а также образованию в структуре

остаточных механических напряжений. Характер изменений величины остаточных напряжений свидетельствует о том, что данные напряжения представляют собой напряжения растягивающего типа, характеризующиеся деформационными искажениями структуры, приводящими к увеличению ее объема и искажению кристаллических и химических связей.

На рисунке 5б представлено изменение величины FWHM спектральных линий. Приведённые данные свидетельствуют о том, что процессы, характерные для формирования структурно-разупорядоченных областей в поврежденном слое, наиболее сильно проявляются при высоких плотностях тока ионного пучка, что приводит к ускорению процессов накопления аморфных включений в поврежденном слое. В случае же малых плотностей тока ионного пучка, изменения величины  $\Delta$ FWHM, наиболее выражены только для спектральной линии  $E_2(\text{high})$ , которая наиболее чувствительна к деформационным искажениям и накоплению аморфных включений.

Анализируя представленные данные можно заключить следующее. Вариация плотности тока ионного пучка при одинаковом флюенсе облучения приводит к различной скорости накопления радиационных повреждений, связанных с образованием большого количества вакансионных комплексов  $O_N - V_{Al}$ , увеличение концентрации которых приводит к частичной аморфизации поврежденного слоя. При этом, в случае малых плотностей тока ионного пучка, доминирующую роль в структурных изменениях играют деформационные искажения, связанные с накоплением остаточных механических напряжений в поврежденном слое, в то время как процессы аморфизации менее проявлены.

#### **Список использованных источников**

1. Alwaeli M., Mannheim V. Investigation into the current state of nuclear energy and nuclear waste management—A state-of-the-art review // *Energies*. 2022 №15(12). P.4275.
2. Ekberg C. et al. Nitride fuel for Gen IV nuclear power systems // *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*. 2018 №318. P.1713-1725.
3. Allen T. R. et al Materials challenges for generation IV nuclear energy systems // *Nuclear Technology*. 2008 №162.3. P.342-357.
4. Cheng Zhaoyi et al. Irradiation effects in high-entropy alloys and their applications // *Journal of Alloys and Compounds*. 2023 №930 P.166768.
5. Wang Bing et al. General synthesis of high-entropy alloy and ceramic nanoparticles in nanoseconds // *Nature Synthesis*. 2022 №1.2 P.138-146.
6. Ren Weiju, Robert Swindeman A review paper on aging effects in Alloy 617 for Gen IV Nuclear Reactor applications // *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*. 2009 №131(2) P.024002-15.
7. Locatelli Giorgio, Mauro Mancini, Nicola Todeschini Generation IV nuclear reactors: Current status and future prospects // *Energy Policy*. 2013 №61 P.1503-1520.
8. Mansur Louis K. et al. Materials needs for fusion, Generation IV fission reactors and spallation neutron sources—similarities and differences // *Journal of Nuclear Materials*. 2004 №329 P.166-172.
9. Xi, Jianqi, et al. Ab initio molecular dynamics simulations of AlN responding to low energy particle radiation // *Journal of Applied Physics*. 2018 №123.4 P.045904.
10. van Vuuren Arno Janse et al. Analysis of the microstructural evolution of silicon nitride irradiated with swift Xe ions // *Ceramics International*. 2020 №46.6 P.7155-7160.
11. Korneeva E. A. et al. Nanoindentation testing of  $Si_3N_4$  irradiated with swift heavy ions // *Journal of Nuclear Materials*. 2021 №555 P.153120.
12. Van Vuuren A. Janse et al. Latent tracks of swift Bi ions in  $Si_3N_4$  // *Materials Research Express*. 2020 №7.2 P.025512.
13. Xie Luxiao et al. Structure and Optical Properties of AlN Crystals Grown by Metal Nitride Vapor Phase Epitaxy with Different V/III Ratios // *ACS omega*. 2022 №7.27 P.23497-23502.