

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПЛАНТАЦИИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ НА СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ SiC

К. Тынышбаева<sup>1)</sup>, А. Козловский<sup>2)</sup>, К.К. Кадыржанов<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

tinishbaeva.kimbat@mail.ru, kozlovskiy.a@inp.kz, kayrat.kadyrzhanov@mail.ru

В работе представлены результаты изменения структурных свойств керамик на основе SiC в результате облучения тяжелыми ионами Ni<sup>12+</sup> с энергией 20 кэВ/заряд и флюенсом 10<sup>14</sup> и 5х10<sup>14</sup> ион/см<sup>2</sup>. В ходе исследования установлены зависимости изменения морфологии поверхности исследуемых керамик в зависимости от флюенса облучения. Согласно полученным данным, при взаимодействии налетающих ионов с веществом, на поверхности образуются области с повышенным содержанием углерода. Данные области представляют собой скопление дефектов и деформированных участков керамики. При этом увеличение флюенса облучения до 5х10<sup>14</sup> ион/см<sup>2</sup> приводит к имплантации ионов никеля в кристаллическую структуру приповерхностного слоя. Согласно данным энергодисперсионного анализа содержание имплантированного никеля составляет 0.03-0.05 ат. %. При этом облучение и последующая имплантация никеля приводит к изменению параметров и объема кристаллической решетки, что свидетельствует об изменении плотности керамики.

**Ключевые слова:** керамики; ионизирующее излучение; имплантация; радиационные дефекты; конструкционные материалы.

## RESEARCH OF THE IMPACT OF IMPLANTATION OF LOW ENERGY IONS ON STRUCTURAL PROPERTIES OF SiC CERAMICS

K. Tynyshbaeva<sup>1)</sup>, A.L. Kozlovskiy<sup>2)</sup>, K.K. Kadyrzhanov<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>The Institute of Nuclear Physics of Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

The paper presents the results of changes in the structural properties of ceramics based on SiC as a result of irradiation with heavy Ni<sup>12+</sup> ions with an energy of 20 keV / charge and a fluence of 10<sup>14</sup> and 5х10<sup>14</sup> ions/cm<sup>2</sup>. In the course of the study, the dependences of the change in the surface morphology of the studied ceramics depending on the irradiation fluence were established. According to the data obtained, in the interaction of the incident ions with a substance, regions with a high carbon content are formed on the surface. These areas are an accumulation of defects and deformed portions of ceramics. At the same time, an increase in the irradiation fluence up to 5х10<sup>14</sup> ion / cm<sup>2</sup> leads to the implantation of nickel ions into the crystal structure of the surface layer. According to the data of the energy dispersive analysis, the content of the implanted nickel is 0.03–0.05 at. % In this case, irradiation and subsequent implantation of nickel leads to a change in the parameters and volume of the crystal lattice, which indicates a change in the density of ceramics.

**Keywords:** ceramics; ionizing radiation; implantation; radiation defects; structural materials.

### Введение

Развитие ядерной промышленности и ядерной энергетики требует применения новых классов материалов, которые отвечают высоким механическим, термическим, изоляционным требованиям, а также должны обладать высокой радиационной стойкостью к различным видам ионизирующего излучения [1-4].

Одним из классов новых материалов, соответствующих данным требованиям, являются керамические материалы на основе оксидов или нитридов. Благодаря своим уникальным физико-химическим, структурным, теплопроводящим и изоляционным свойствам, керамики на основе карбида кремния рассматриваются как один из перспективных материалов активной зоны реакторов Generation IV. При этом одним из важных условий применимости керамических материалов является их устойчивость к радиационному воздействию и ионизирующему излучению [5-7].

Карбид кремния является перспективным веществом, который нашел свое применение в качестве материалов для ядерных реакторов, микроэлектроники и т.д.

### Экспериментальная часть

Ионная имплантация низкоэнергетическими ионами Ni<sup>12+</sup> с энергией 20 кэВ керамик на основе SiC проводилась на ускорителе тяжелых ионов «ДЦ-60». Флюенс облучения составил 10<sup>14</sup> и 5х10<sup>14</sup> ион/см<sup>2</sup>.

Исследование структурных характеристик керамик проводилось с использованием растрового электронного микроскопа Hitachi TM3030 с системой микроанализа Bruker XFlash MIN SVE при ускоряющем напряжении 15 кВ. Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре D8 ADVANCE ECO при использовании излучения CuK<sub>α</sub>. Для идентификации фаз и исследования кристаллической структуры использовалось программное обеспечение Bruker AXSDIFFRAC. EVA.4.2 и база данных ICDD PDF-2.

### Результаты и их обсуждение

В случае применения новых материалов в качестве конструкционных наибольшему воздействию радиации и последующих процессов деградации

подвергается именно приповерхностный слой материала, которой напрямую или косвенно взаимодействует с ядерным топливом и продуктами деления, а также нейтронным излучением. При этом в приповерхностном слое облучение может вызвать частичную деградацию структуры за счет накопления высокой концентрации дефектов или аморфных включений, которые разрушают кристаллические и химические связи в керамике. Одним из способов повышения радиационной стойкости является ионная имплантация в приповерхностный слой которая приводит к изменению структурных и прочностных характеристик за счет внедрения ионов и образования примесных включений, приводящих к снижению радиационного воздействия. При облучении тяжелыми ионами с низкой энергией, основные структурные и морфологические изменения связаны с приповерхностным слоем толщиной не более 1 мкм.

На рис. 1 представлена динамика изменения основных дифракционных максимумов исследуемых образцов до и после облучения.

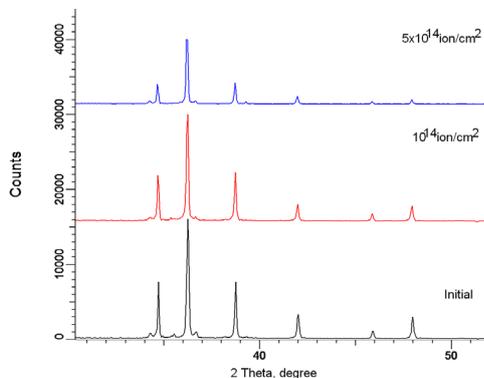


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы исследуемых образцов до и после облучения

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of the studied samples before and after irradiation

Согласно полученным данным, исходные образцы представляют собой поликристаллические структуры SiC с гексагонального типа кристаллической решетки, пространственной сингонии  $R\bar{3}m(156)$ . Параметры кристаллической решетки исходного образца составили  $a=3.0366 \text{ \AA}$ ,  $c=36.5117 \text{ \AA}$ , объем решетки  $V=291.6 \text{ \AA}^3$ , средний размер кристаллитов составил 85 нм. Для облученных образцов наблюдается изменение формы и интенсивности дифракционных максимумов, что свидетельствует о воздействии налетающих ионов на кристаллическую структуру. При этом искажение дифракционных максимумов свидетельствует о возникновении в структуре дополнительных искажений и деформаций, возникновение которых может быть обусловлено имплантацией ионов никеля в узлы или междоузлия кристаллической решетки. Для облученных образцов наблюдается незначительное снижение объема кристаллической решетки до  $290.5 \text{ \AA}^3$  и  $289.4 \text{ \AA}^3$  для образцов, облученных флюенсом  $10^{14}$  и  $5 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> соответственно. Уменьшение объема решетки свидетельствует об увеличении плотности керамики, которое обусловлено деформационными процессами и импланта-

цией ионов никеля в структуру керамик. Согласно данным энергодисперсионного анализа для образцов облученных флюенсом  $5 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> в структуре наблюдается наличие атомов никеля в процентном содержании 0.03-0.05 ат. %, наличие которых свидетельствует о процессах имплантации с повышением флюенса. При этом согласно данным растровой электронной микроскопии (рис. 2) для облученных образцов в приповерхностном слое формирование дефектных областей, содержащих на своих границах высокое содержание углерода.

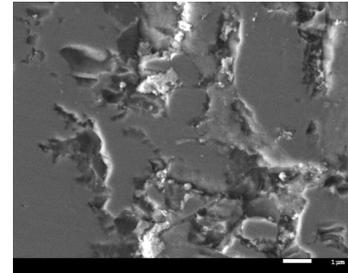


Рис. 1. РЭМ изображение поверхности исследуемого образца после облучения флюенсом  $5 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>

Fig. 1. SEM image of the surface of the sample after irradiation with a flux of  $5 \times 10^{14}$  ion/cm<sup>2</sup>

При этом, согласно данным результатов картирования, скопление никеля наблюдаются также вблизи границ дефектных областей, что может быть обусловлено миграцией никеля к границам с последующим образованием вблизи границ никелевых включений.

## Закключение

В работе представлены результаты изменения структурных свойств керамик на основе SiC в результате облучения тяжелыми ионами  $Ni^{12+}$  с энергией 20 кэВ/заряд и флюенсом  $10^{14}$  и  $5 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>. Ионная имплантация низкоэнергетическими ионами  $Ni^{12+}$  с энергией 20 кэВ керамик на основе SiC проводилось на ускорителе тяжелых ионов «ДЦ-60». В ходе исследования установлены зависимости изменения морфологии поверхности исследуемых керамик в зависимости от флюенса облучения.

## Библиографические ссылки / References

1. Kozlovskiy A., et al. Optical and structural properties of AlN ceramics irradiated with heavy ions. *Optical Materials* 2019; 91: 130-137.
2. Kozlovskiy A., et al. Influence of He-ion irradiation of ceramic AlN. *Vacuum* 2019; 163: 45-51.
3. Gladkikh T., et al. Radiation resistance of AlN ceramics as a result of irradiation with low-energy C<sup>2+</sup> ions. *Materials Characterization* 2019; 150: 88-97.
4. Kozlovskii A.L., Dukenbaev K., and Zdorovets M.V. Radiation Defects in Aluminum Nitride-Based Ceramics. *High Energy Chemistry* 2019; 53(1): 71-75.
5. Dukenbayev K., et al. Investigation of radiation resistance of AlN ceramics. *Vacuum* 2019; 159: 144-151.
6. Kozlovskiy A. Influence of irradiation temperature on properties change of AlN ceramics. *Vacuum* 2018; 158: 93-100.
7. Kozlovskiy A., et al. Effect of swift heavy ions irradiation on AlN ceramics properties. *Ceramics International* 2018; 44(16): 19787-19793.