

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ Ni НАНОСТРУКТУР

Д.И. Шлимас<sup>1), 2)</sup>

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

<sup>2)</sup>Институт ядерной физики Министерства Энергетики, Алматы, Казахстан  
shlimas@mail.ru

В работе представлены результаты изменения структурных и проводящих свойств Ni наноструктур от типа иона и флюенса облучения. В качестве бомбардирующих пучков использовались ионы  $B^{2+}$ ,  $Ca^{5+}$ ,  $Fe^{7+}$ . Флюенс облучения составил  $10^{10}$ ,  $10^{11}$  и  $5 \times 10^{11}$  ион/см<sup>2</sup>. Установлено, что в образцах, облученных ионами  $B^{2+}$  и  $Ca^{5+}$ , основные структурные изменения связаны с аморфизацией или переориентацией текстуры, а для образцов, облученных ионами  $Fe^{7+}$ , наблюдается формирование малоинтенсивных пиков, характерных для соединения FeNi. Установлено, что увеличение степени кристалличности свидетельствует о положительном влиянии ионов кальция на кристаллическую структуру, которое заключается в частичном отжиге дефектов и снятии напряжений и искажений в кристаллической решетке.

**Ключевые слова:** наноструктуры; ионизирующее излучение; проводящие свойства; радиационные дефекты; нанотрубки.

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF IONIZING RADIATION ON THE STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF Ni NANOSTRUCTURES

D.Y. Shlimas<sup>1), 2)</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 work presents the changes in the structural and conductive properties of Ni nanostructures.  $B^{2+}$ ,  $Ca^{5+}$ ,  $Fe^{7+}$  ions were used as the bombarding beams. Fluence irradiation constitutes  $10^{10}$ ,  $10^{11}$  и  $5 \times 10^{11}$  ion/cm<sup>2</sup>. It has been established that in the samples irradiated with  $B^{2+}$  and  $Ca^{5+}$  ions, the main structural changes are associated with amorphization or texture reorientation, and for samples irradiated with  $Fe^{7+}$  ions, the formation of low intense peaks characteristic of FeNi is observed. It has been established that an increase in the degree of crystallinity indicates a positive effect of calcium ions on the crystal structure, which consists in the partial annealing of defects and the removal of stresses and distortions in the crystal lattice.

**Keywords:** nanostructures; ionizing radiation; conductive properties; radiation defects; nanotubes.

### Введение

Одним из важных критериев применимости наноструктур в электронике и космической и космической технике является их устойчивость к различного рода ионизирующего излучения, а также оценки влияния облучения на структурные и проводящие свойства наноматериалов [1-3]. При взаимодействии налетающих частиц с кристаллической структурой происходит колоссальная передача энергии в электронную и ядерную подсистемы, что приводит к образованию каскадов вторичных дефектов и электронов. При этом большая часть образовавшихся дефектов аннигилирует за очень короткие промежутки времени. В свою очередь выжившая часть дефектов способна привести к изменению структурных свойств, путем изменения концентрации дислокаций, частичного отжига дефектов и напряжений в структуре [4]. При малых флюенсах облучения ( $10^{10}$ - $10^{11}$  ион/см<sup>2</sup>), которым характерно образование одиночных неперекрывающихся областей прохождения ионов в материале, в структуре образуется большое количество точечных дефектов и вакансий.

В зависимости от типа налетающих ионов, в кристаллической структуре наноматериалов могут происходить различные процессы дефектообразования от отжига дефектов и перекристаллизации до имплантации и фазовых

превращений [5]. Различие в типах процессов обусловлено в первую очередь разницей в энергетических потерях налетающих частиц, а также преобладанием различных типов взаимодействия ионов с кристаллической структурой наноматериалов. При этом изменяя тип и энергию налетающих частиц можно контролировать глубину проникновения ионов в материале, проводить направленную модификацию структуры, а также оценить устойчивость наноструктур к воздействию ионизирующего излучения [6].

На основании вышесказанного представляет интерес изучения процессов дефектообразования в наноструктурах с целью оценки возможности применения различных видов излучения для структурной модификации и радиационной стойкости наноматериалов. В работе представлены результаты исследования изменения структурных характеристик Ni нанотрубок под действием облучения различными ионами.

### Экспериментальная часть

Облучение наноструктур проводилось на ускорителе тяжелых ионов «DC-60» в ПЭТ-шаблонах для сохранения ориентации массива нанотрубок относительно ионного пучка. В качестве бомбардирующих пучков использовались ионы  $B^{2+}$ ,  $Ca^{5+}$ ,  $Fe^{7+}$

с энергией 18, 68 и 95 МэВ, соответственно. Флюенс облучения составил  $10^{10}$ ,  $10^{11}$  и  $5 \times 10^{11}$  ион/см<sup>2</sup>. Выбор прогнозируемого диапазона проводился таким образом, чтобы ион передавал всю свою энергию наноструктурам, т. е. проходил максимальный путь в нанотрубках, но не выходил за их пределы.

Исследование структурных характеристик и элементного состава нанотрубок 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 (Bruker, Германия) при использовании излучения  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda=1,54060$  Å). Для идентификации фаз и исследования кристаллической структуры использовались программное обеспечение Bruker AXSDIFFRAC.EVA v.4.2 и международная база данных ICDD PDF-2.

### Результаты и их обсуждение

Одним из важных факторов исследования влияния облучения на материалы, является изменение кристаллографических характеристик до и после облучения. Наиболее достоверным методом исследования данных изменений является метод рентгеноструктурного анализа, который позволяет оценить изменения кристаллографических характеристик образцов до и после облучения.

Согласно полученным данным, исходные образцы представляют собой поликристаллические структуры Ni с гранцентрированного типа кристаллической решетки, пространственной сингонии Fm3m(225). При этом для исходных образцов характерно наличие выделенного текстурного направления (111). Величина параметра кристаллической решетки составило 3.5002 Å отличие параметра от эталонного значения ( $a_0=3.5238$  Å) обусловлено искажениями и изменением межплоскостных расстояний в процессе синтеза. Уширенная форма дифракционных максимумов свидетельствует о малых размерах кристаллитов, среднее значение которых не превышает 25-27 нм.

Для образцов, облученных ионами  $\text{V}^{2+}$ , увеличение флюенса облучения приводит к резкому снижению интенсивностей дифракционных пиков и асимметрии линий. Резкое снижение интенсивностей свидетельствует о частичной аморфизации и разрушении химических и кристаллических связей, вследствие процессов дробления кристаллитов и образованием большого количества дислокаций. Такое разрушительное воздействие ионов бора обусловлено большими энергетическими потерями и большой проникающей способностью, а также нестабильностью ионов бора и последующим их распадом с выделением колоссального количества энергии. Образование локальных областей с высокой плотностью дефектов может привести к резкому увеличению напряжений и искажений в структуре, которые приводят к деградации и аморфизации структуры.

В случае облучения ионами  $\text{Ca}^{5+}$  картина изменения кристаллической структуры заметно отличается от изменений при облучении ионами  $\text{V}^{2+}$ . Главное отличие заключается в изменении ориен-

тации текстурных плоскостей и последующим преобладанием направления (220), что свидетельствует о переориентации кристаллитов под действием облучения. При этом согласно полученным данным, на дифрактограммах наблюдается незначительное увеличение асимметрии дифракционных пиков, что свидетельствует о малом содержании искажений и напряжений в структуре. Изменение ориентации текстуры может быть обусловлено активной миграцией образовавшихся дефектов вдоль направления (220) к стокам дефектов на границах зерен, с последующей перекристаллизацией и изменением их ориентации в структуре.

В отличие от образцов, облученных ионами  $\text{V}^{2+}$  и  $\text{Ca}^{5+}$ , для которых согласно данным рентгеновской дифракции основные структурные изменения связаны с аморфизацией или переориентацией текстуры, для образцов облученных ионами  $\text{Fe}^{7+}$  наблюдается формирование мало интенсивных пиков характерных для соединения FeNi. Появление новых пиков FeNi свидетельствует об имплантации ионов  $\text{Fe}^{7+}$  в междоузлия или узлы решетки с последующим образованием фазы твердого раствора. При этом увеличение флюенса облучения приводит к увеличению интенсивностей пиков характерных для FeNi, что свидетельствует об увеличении содержания примесной фазы в структуре. Содержание примесной фазы для образцов облученных флюенсом  $10^{10}$  ион/см<sup>2</sup> составляет не более 1.5%, в то время как для образцов облученных флюенсами  $10^{11}$  и  $5 \times 10^{11}$  ион/см<sup>2</sup> содержание фазы составляет 4.6 и 8.7%, соответственно. Увеличение содержания примесной фазы может быть обусловлено близкими химическими свойствами и ионными радиусами атомов Fe и Ni, что приводит к замещению ионами Fe атомов Ni в решетке, с последующим образованием стабильных соединений. Формирование примесных включений приводит к резкому снижению интенсивности пика (220), что свидетельствует о переориентации кристаллитов, в результате внедрения ионов Fe.

Также немаловажным фактором, влияющим на изменение структурных свойств, является количество вакансий и их энергия образующихся в результате взаимодействия налетающих ионов с атомами мишени. Для ионов  $\text{Ca}^{5+}$  и  $\text{Fe}^{7+}$  согласно расчетным данным SRIM Pro, количество вакансий, образующихся в структуре, превышает 10000 и 20000 вакансий/ион соответственно. Высокая концентрация вакансий, обладающих достаточно большой энергией способно создать большое количество вторичных дефектов и смещений атомов из узлов решетки. Однако в случае ионов бора, образующиеся вакансии обладают большей энергией и, следовательно, большей подвижностью, которая приводит к образованию дивакансий и областей разупорядоченности. При этом большие энергетические потери ионов  $\text{Fe}^{7+}$  на ядрах способны привести к большому количеству первично-выбитых атомов из узлов решетки, место которых занимают ионы  $\text{Fe}^{7+}$  с последующим образованием новой фазы.

### Заключение

В результате проведенных экспериментов установлены зависимости изменения структурных и

проводящих свойств Ni наноструктур от типа иона и флюенса облучения. В качестве бомбардирующих пучков использовались ионы  $V^{2+}$ ,  $Ca^{5+}$ ,  $Fe^{7+}$  с энергией 18, 68 и 95 МэВ, соответственно. Флюенс облучения составил  $10^{10}$ ,  $10^{11}$  и  $5 \times 10^{11}$  ион/см<sup>2</sup>. С применением метода рентгеноструктурного анализа установлено, что в отличие от образцов облученных ионами  $V^{2+}$  и  $Ca^{5+}$ , для которых основные структурные изменения связаны с аморфизацией или переориентацией текстуры, для образцов облученных ионами  $Fe^{7+}$  наблюдается формирование мало интенсивных пиков характерных для соединения FeNi. При этом наибольшая концентрация областей искажений и разупорядоченности структуры наблюдается для образцов облученных ионами кальция, наблюдается незначительное увеличение степени кристалличности. Увеличение степени кристалличности свидетельствует о положительном влиянии ионов кальция на кристаллическую структуру, которое заключается в частичном отжиге дефектов и снятии напряжений и искажений в кристаллической решетке.

#### Библиографические ссылки / References

1. Kozlovskiy A., and Zdorovets M. Study of the applicability of directional modification of nanostructures to improve the efficiency of their performance as the anode material of lithium-ion batteries. *Materials Research Express* 2019; 6(7): 075066.
2. Kaniukov E. Yu, et al. Degradation mechanism and way of surface protection of nickel nanostructures. *Materials Chemistry and Physics* 2019; 223: 88-97.
3. Tishkevich D.I., et al. Function composites materials for shielding applications: correlation between phase separation and attenuation properties. *Journal of Alloys and Compounds* 2019; 771: 238-245.
4. Kozlovskiy A. Influence of irradiation temperature on properties change of AlN ceramics. *Vacuum* 2018; 158: 93-100.
5. Kozlovskiy A., Shlimas D., and Zdorovets M. Investigation of the effect of ionizing radiation on the structural and conductive characteristics of Ni nanostructures. *Vacuum* 2019; 163: 103-109.
6. Kozlovskiy A., et al. Effect of irradiation with  $C^{2+}$  and  $O^{2+}$  ions on the structural and conductive characteristics of copper nanostructures. *Materials Research Express* 2019; 6(7): 075072.