

УДК 53.043

Влияние ионизирующего облучения на параметры массивов Zn нанотрубок для создания элементов гибкой электроники

Кадыржанов Д.Б.¹, Здоровец М.В.^{1,2,3}, Козловский А.Л.^{1,2}, Петров А.В.⁴, Бундюкова В.Д.⁴, Шумская Е.Е.⁴, Каниюков Е.Ю.⁴

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
пр. Абылай хана, 2/1, г. Астана 010008, Казахстан

²Астанинский филиал Института ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан,
пр. Абылай хана, 2/1, г. Астана 010008, Казахстан

³Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
пр. Мира, 19, г. Екатеринбург 620075, Россия

⁴Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 19.01.2018

Принята к печати 21.02.2018

Целью работы являлось изучение возможности применения массивов Zn нанотрубок в качестве основы для создания малогабаритных и легковесных элементов гибкой электроники, в том числе в условиях воздействия ионизирующего излучения.

В работе представлены результаты синтеза Zn нанотрубок, полученных путем электрохимического осаждения в поры полимерных матриц, и изучение их структурных и электрофизических свойств после направленной модификации ионизирующим излучением с различной дозой. Методами растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного и энергодисперсионного анализа изучена структура нанотрубок, имеющих поликристаллическую структуру и полностью состоящих из цинка, и продемонстрировано, что облучение ионами Ar^{8+} с дозой от 1×10^9 до 5×10^{11} ион/см² и энергией 1,75 МэВ/нуклон оказывает влияние на кристаллическую структуру нанотрубок.

При больших дозах в Zn нанотрубок возникают локализованные высокодефектные зоны, приводящие к критическому изменению структуры и, соответственно, электропроводности: при малых дозах электропроводность увеличивается, однако при достижении порогового значения – резко снижается. Таким образом, был установлен механизм воздействия ионизирующего облучения на наноматериалы и определена возможность применения массивов Zn нанотрубок в качестве основы для создания малогабаритных и легковесных элементов гибкой электроники.

Ключевые слова: срадиационное материаловедение, нанотехнологии, кристаллическая структура, электропроводность, гибкая электроника.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-66-73

Адрес для переписки:

Шумская Е.Е.
НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: lunka7@mail.ru

Address for correspondence:

Shumskaya A.E.
Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus
e-mail: lunka7@mail.ru

Для цитирования:

Кадыржанов Д.Б., Здоровец М.В., Козловский А.Л., Петров А.В.,
Бундюкова В.Д., Шумская Е.Е., Каниюков Е.Ю.

Влияние ионизирующего облучения на параметры массивов Zn нанотрубок для создания элементов гибкой электроники
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 66–73.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-66-73

For citation:

Kadyrzhanov D.B., Zdorovets M.V., Kozlovskiy A.L., Petrov A.V.,
Bundyukova V.D., Shumskaya A.E., Kaniukov E.Yu.

[Influence of ionizing irradiation on the parameters of Zn nanotubes arrays for design of flexible electronics elements].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 66–73 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-66-73

Influence of ionizing irradiation on the parameters of Zn nanotubes arrays for design of flexible electronics elements

Kadyrzhanov D.B.¹, Zdorovets M.V.^{1,2,3}, Kozlovskiy A.L.^{1,2}, Petrov A.V.⁴, Bundyukova V.D.⁴, Shumskaya A.E.⁴, Kaniukov E.Yu.⁴

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University,
Abylay Hana Ave., 2/1, Astana 010008, Kazakhstan

²Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan,
Abylay Hana Ave., 2/1, Astana 010008, Kazakhstan

³Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Mira str., 19, Ekaterinburg 620002, Russia

⁴Scientific and Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus,
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus

Received 19.01.2018

Accepted for publication 21.02.2018

Abstract

The aim of the study is establishing the possibility of using Zn nanotube arrays as a basis for design compact and lightweight elements of flexible electronics, including operating under influence of ionizing irradiation.

The paper presents the results of the synthesis of Zn nanotubes obtained by electrochemical deposition in the pores of polymer matrices and the study of their structural and electrophysical properties after directional modification by ionizing radiation with different doses. Using the methods of scanning electron microscopy, X-ray diffraction and energy dispersive analysis, the structure of nanotubes having a polycrystalline structure and completely consisting of zinc was studied and it was demonstrated that irradiation with Ar⁸⁺ ions with a dose from 1×10^9 to 5×10^{11} ion/cm² and energy 1.75 MeV/nucleon has an effect on the crystal structure of nanotubes.

At high doses, localized highly defect zones arise, leading to a critical change in the structure and physical properties of the nanotubes, respectively. It is shown that the consequence of the modification of the crystal structure is a change in the electrical conductivity of nanotubes: at low doses the electrical conductivity increases, but when the threshold value is reached, it sharply decreases. The change in the crystal structure and the corresponding changes in the conductive properties of Zn nanotubes due to irradiation determine the mechanism of ionizing radiation influence on nanomaterials and determine the possibility of using Zn nanotubes arrays as a basis for creating compact and lightweight elements of flexible electronics.

Keywords: radiation material science, nanotechnology, crystal structure, conducting properties, flexible electronics.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-66-73

Адрес для переписки:

Шумская Е.Е.
НППЦ НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: lunka7@mail.ru

Address for correspondence:

Shumskaya A.E.
Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus
e-mail: lunka7@mail.ru

Для цитирования:

Кадыржанов Д.Б., Здоровец М.В., Козловский А.Л., Петров А.В.,
Бундюкова В.Д., Шумская Е.Е., Каниюков Е.Ю.
Влияние ионизирующего облучения на параметры массивов Zn на-
нотрубок для создания элементов гибкой электроники
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 66–73.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-66-73

For citation:

Kadyrzhanov D.B., Zdorovets M.V., Kozlovskiy A.L., Petrov A.V.,
Bundyukova V.D., Shumskaya A.E., Kaniukov E.Yu.
[Influence of ionizing irradiation on the parameters of Zn nanotubes
arrays for design of flexible electronics elements].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 66–73 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-66-73

Введение

Среди огромного разнообразия материалов Zn [1] и ZnO [2, 3] являются одними из наиболее перспективных для создания наноструктур на их основе, так как они обладают как полупроводниковыми, так и пьезоэлектрическими свойствами, что может служить основой для создания малогабаритных и легковесных элементов гибкой электроники, в том числе предназначенных для работы в экстремальных условиях. Модификация с применением ионизирующего излучения наноструктурных материалов является одной из задач современного материаловедения, поскольку носит как прикладной, так и фундаментальный характер. Путем облучения ионными пучками представляется возможным не только модифицировать структуру наноматериалов [4–8], но и изменить проводимость наноструктур [9, 10].

Фундаментальный аспект изучения влияния ионизирующего излучения состоит в определении механизмов его взаимодействия с наноразмерными объектами, определении характера и свойств возникающих дефектов и их влияния на свойства материала. Известно, что взаимодействие пучков тяжелых ионов с материалом происходит посредством двух механизмов, наблюдаемых при разных энергиях ионов: за счет столкновений с ядрами и с электронами. Электронные потери энергии представляют собой неупругий процесс, который включает в себя возбуждение электронов и доминирует при энергии налетающих ионов > 1 МэВ/нукл. В то же время потеря энергии на ядрах включает в себя замедление налетающего иона за счет упругих столкновений и доминирует при низких энергиях (< 10 – 60 кэВ/нукл). Такое взаимодействие приводит к изменению структуры из-за формирования точечных дефектов в кристаллической структуре. Точечные радиационные дефекты могут аннигилировать или стекать по границам зерен. При больших энергиях облучающих ионов характерны каскадные атомные столкновения. Задача анализа таких явлений до сих пор не решена. Наиболее сложными для описания и анализа являются процессы эволюции кристаллической структуры вследствие облучения: диффузия, рекомбинация, а также образование комплексных дефектов. Указанные процессы определяют нарушения в кристаллической решетке и вызывают изменение как физических, так и механических характеристик наноструктур [9, 10]. В то же время структурные

изменения, связанные с изменением количества и характера дефектов при радиационном отжиге металлических наноструктур, приводят к изменению проводимости. При этом важными факторами при радиационной модификации являются энергия налетающих ионов и доза облучения, которые определяют конечную концентрацию дефектов в структуре.

С практической точки зрения наиболее интересными являются исследования, посвященные радиационной модификации структуры и физических свойств массивов наноразмерных материалов, таких как нанотрубки и нанопроволоки. Как массивы, так и одиночные нанотрубки и нанопроволоки могут стать основой микро- и наноэлектроники устройств в качестве элементов диодных и транзисторных систем. Благодаря своим уникальным структурным свойствам цилиндрические наноструктуры обладают потенциальной возможностью применения в качестве фотоэлектрических элементов, датчиков, лазеров, солнечных элементов, фотодетекторов. Особый интерес представляют структуры, полученные хорошо масштабируемым методом шаблонного синтеза в порах полимерных трековых мембран, позволяющих создавать целый класс малогабаритных и легковесных элементов гибкой электроники. Известны экспериментальные данные по исследованию влияния низкоэнергетических пучков тяжелых ионов на структуру и транспортные свойства Zn нанотрубок [7]. Нами в предыдущих работах было показано влияние облучения ионами Xe^{22+} [10] и электронами на структурные характеристики массивов Zn нанотрубок. В представленной работе на примере облучения ионами Ag^{8+} показано влияние воздействия ионизирующего излучения на структуру и электропроводимость массивов Zn нанотрубок с целью определения возможности их использования в качестве основы для создания малогабаритных и легковесных элементов гибкой электроники, в том числе предназначенных для работы в экстремальных условиях.

Методика

В качестве шаблонов для синтеза наноструктур Zn были использованы трековые мембраны толщиной 12 мкм на основе полиэтилентерефталата с порами диаметром 380 ± 10 нм. Электрохимическое осаждение в поры шаблонной матрицы проводилось в потенциостатиче-

ском режиме при напряжении 1,75 В. Состав раствора электролита: $ZnSO_4 \times 7H_2O$ (360 г/л), NH_4Cl (30 г/л), $NaC_2H_3O_2 \times 3H_2O$ (15 г/л), $C_6H_8O_6$ (120 г/л). Контроль за процессом роста наноструктур осуществлялся методом хроноамперометрии мультиметром Agilent 34410A. Для создания катода на шаблоны методом магнетронного напыления в вакууме наносился слой золота толщиной 10 нм, который служил рабочим электродом (катодом) при осаждении. При данных условиях напыления поры в матрице оставались открытыми, что позволяло получать наноструктуры в форме нанотрубок. Особенности получения формирования металлических нанотрубок в порах полимерных шаблонов приведены в работе [11].

Облучение Zn нанотрубок в полимерных шаблонах ионами Ag^{+8} с флюенсом от 1×10^9 до 5×10^{11} ион/см² проводилось на ускорителе тяжелых ионов «ДЦ-60» Астанинского филиала Института ядерной физики при давлении 10^{-4} Па. При этом траектория пробега ионов пролегла вдоль главной оси нанотрубок. Доза облучения задавалась путем изменения времени экспозиции. Оценка с использованием программного комплекса *SRIM 2013 Pro* показала, что при выбранной энергии 1,75 МэВ/нуклон расчетная длина пробега ионов Ag^{+8} в Zn нанотрубках составляет порядка 10 мкм, что меньше длины нанотрубок (12 мкм).

Исследование морфологических характеристик и элементного состава полученных нанотрубок до и после облучения проводилось с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) *Hitachi TM3030* с системой энергодисперсионного микроанализа (ЭДА) *Bruker XFlash MIN SVE* при ускоряющем напряжении 15 кВ. Рентгеноструктурный анализ (РСА) проводился на дифрактометре *D8 ADVANCE ECO* с использованием излучения рентгеновской трубки с Cu-анодом и графитового монохроматора на дифрагированном пучке. Дифрактограммы записывались в диапазоне углов $30-90^\circ 2\theta$, с шагом $0,01^\circ 2\theta$. Для идентификации фаз и исследования кристаллической структуры использовалось программное обеспечение *Bruker AXSDIFFRAC.EVA v.4.2* и международная база данных *ICDD PDF-2*.

Определение электрофизических свойств массивов нанотрубок проводилось с использованием источника тока *HP 66312A* (США) и мультиметра *34401A Agilent* (США). Вольт-амперные

характеристики снимались с массива нанотрубок площадью 1,0 см² следующим образом: между двумя металлическими пластинами помещали образец с Zn нанотрубками таким образом, чтобы пластины перекрывали только ту часть, где нанотрубки находятся в пленке. Затем пластины подсоединяются к источнику тока с последовательным соединением мультиметра. Так как полимерный темплат имеет диэлектрическую природу, то во всем измеряемом диапазоне напряжений от $-1,3$ до $1,3$ В матрица не вносит вклад в электропроводящие характеристики нанотрубок.

Основная часть

При электроосаждении в поры ионо-трековых мембран были получены наноструктуры, представляющие собой трубки высотой 12 мкм, с внешним диаметром 380 нм (который задавался диаметром пор матрицы), внутренним диаметром 180 нм и толщиной стенок 100 нм. РЭМ снимки массивов Zn нанотрубок после удаления полимерной матрицы представлены на рисунке 1.

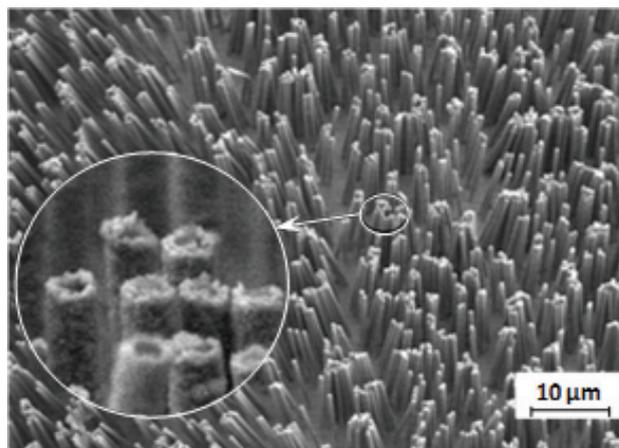


Рисунок 1 – РЭМ-изображение массива Zn нанотрубок после удаления полимерной матрицы

Figure 1 – SEM-images of array of Zn nanotubes after polymer template dissolution

Фазовый состав и параметры кристаллической решетки Zn нанотрубок были исследованы методом РСА, который подтвердил (рисунок 2), что синтезированные исходные образцы состоят из Zn с гексагональной примитивной решеткой с параметрами элементарной ячейки $a = 2,6638 \text{ \AA}$, $c = 4,9337 \text{ \AA}$ (*PDF # 04-0831*, $a = 2,665 \text{ \AA}$, $c = 4,947 \text{ \AA}$). Отличие значения параметра элементарной ячейки от эталонного значения, скорее всего, обусловлено микронапряжениями, возникающими в структуре в процессе синтеза.

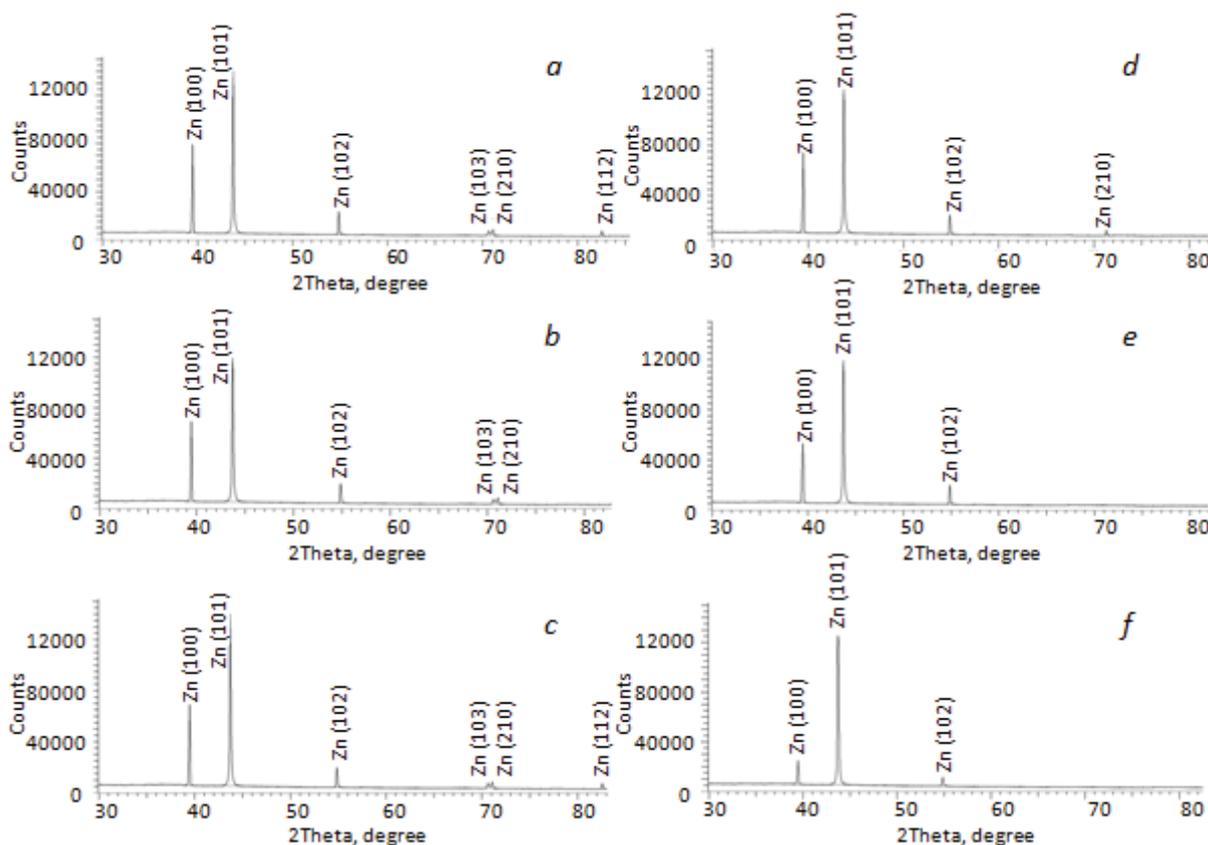


Рисунок 2 – PCA-спектры Zn нанотрубок, облученных с различной дозой: *a* – исходный; *b* – 1×10^9 ион/см²; *c* – 1×10^{10} ион/см²; *d* – 5×10^{10} ион/см²; *e* – 1×10^{11} ион/см²; *f* – 5×10^{11} ион/см²

Figure 2 – XRD-spectrum of Zn nanotubes irradiated with different doses: *a* – pristine; *b* – 1×10^9 ion/cm²; *c* – 1×10^{10} ion/cm²; *d* – 5×10^{10} ion/cm²; *e* – 1×10^{11} ion/cm²; *f* – 5×10^{11} ion/cm²

Как видно, с увеличением флюенса происходит изменение кристаллической структуры, что легко проследить по изменению параметра элементарной ячейки (таблица 1).

Таблица 1 / Table 1

Эволюция параметров кристаллической решетки Zn после облучения ионами Ar⁸⁺ с различной дозой
Evolution of the Zn lattice parameters after irradiation with Ar⁸⁺ ions with different doses

Доза, ион/см ² Doze, ion/cm ²	Исходный Pristine	1×10^9 ион/см ² ion/cm ²	1×10^{10} ион/см ² ion/cm ²	5×10^{10} ион/см ² ion/cm ²	1×10^{11} ион/см ² ion/cm ²	5×10^{11} ион/см ² ion/cm ²
<i>a</i> , Å	2,6638	2,6641	2,6646	2,6649	2,6663	2,6672
<i>c</i> , Å	4,9337	4,9332	4,9327	4,9323	4,9321	4,9317

При увеличении дозы наблюдается незначительный рост параметров элементарной ячейки. Также при анализе представленных на рисунке 2 данных можно заметить, что с увеличением дозы облучения наблюдается снижение интенсивностей пиков при больших углах и при флюенсе облучения выше 5×10^{10} ион/см² интенсивность пиков для плоскостей (103), (210) и (212) снижается до минимума и сравнима по величине с фоновым излучением. Снижение интенсивностей может быть обусловлено изменением текстурных

коэффициентов (*TC*), которые рассчитывались по формуле Харриса (1):

$$TC(hkl) = \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)} \bigg/ \frac{1}{n} \sum \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}, \quad (1)$$

где $I(hkl)$ – экспериментально полученная относительная интенсивность; $I_0(hkl)$ – относительная интенсивность, соответствующая данной плоскости согласно базе JCPDS; n – количество плоскостей. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Расчетные текстурные коэффициенты

Calculated texture coefficients

<i>hkl</i>	<i>TC (hkl)</i>					
	Исходный Pristine	1×10^9 ион/см ² ion/cm ²	1×10^{10} ион/см ² ion/cm ²	5×10^{10} ион/см ² ion/cm ²	1×10^{11} ион/см ² ion/cm ²	5×10^{11} ион/см ² ion/cm ²
100	0,7852	0,7146	0,7314	0,6931	0,5633	0,4521
101	1,0314	1,0452	1,1067	1,1462	1,1863	1,2156
102	0,4551	0,4135	0,4062	0,3984	0,3468	0,2461
103	0,3414	0,3151	0,3015	0,2893	–	–
210	0,3241	0,2972	0,2842	0,2576	0,1351	–
212	0,2315	0,2146	–	–	–	–

Текстурные коэффициенты больше единицы для направления указывают на преимущественную ориентацию кристаллитов (областей когерентного рассеяния), что предполагает увеличение числа зерен вдоль этих направлений. Число отражений (*n*) соответствует максимальному значению текстурных коэффициентов. Значения *TC(hkl)* исходного образца Zn нанотрубок подтверждают предположение о поликристаллической структуре с доминирующим направлением [101]. Незначительное регистрируемое изменение в кристаллической структуре связано с локализацией дефектов при их незначительном количестве относительно размеров самих образцов. Учитывая, что характер радиационных повреждений материала сильно зависит от энергии иона, и принимая во внимание, что выбранная энергия ионов Ar⁸⁺ составляет 1,75 МэВ/нуклон (т.е. расчетная длина пробега ионов в Zn нанотрубках 10 мкм меньше длины нанотрубок в 12 мкм), необходимо учитывать локальные изменения структуры, возникающие из-за уменьшения энергии ионов при их движении вдоль трека.

Известно, что энергия ионов может передаваться двумя механизмами: за счет энергии ядерных потерь (*S_e*), которая связана с передачей энергии атому через упругое столкновение и доминирует при низкой энергии (< 1 МэВ/нуклон), и энергии электронных потерь (*S_n*), которая представляет собой неупругое столкновение налетающего иона с электронами атомов мишени и доминирует при более высокой энергии (> 1 МэВ/нуклон).

Электронное торможение ионов приводит к переходу электронов на более высокие свободные энергетические уровни и, соответственно, образованию электронных вакансий на низких энергетических уровнях, т.е. происходит возбуждение атомов. В результате неупругих взаимодей-

ствий возникают электромагнитное излучение, приводящее ко вторичной ионизации. Упругое торможение порождает в первую очередь точечные дефекты типа пары Френкеля, а также каскады таких точечных дефектов.

При облучении наноструктур ионами Ar⁸⁺ с энергией 1,75 МэВ/нуклон возникают электронные (*S_e*) и ядерные (*S_n*) потери энергии, которые согласно расчету с применением программного обеспечения *SRIM Pro 2013* сопоставимы. Так как электронные и ядерные энергетические потери способствуют локальному нагреву образца в области взаимодействия ионов с кристаллической решеткой. При последующей рекристаллизации происходит релаксация напряжений вследствие отжига дефектов и образование новых зерен с кристаллической структурой, близкой к эталонной. Таким образом, наблюдается переориентация текстурных направлений, что подтверждается данными рентгеноструктурного анализа.

В то же время при замедлении ионов в определенный момент времени их энергии становится недостаточно для электронного взаимодействия или образования каскадных дефектов, но достаточно для образования точечных дефектов типа пары Френкеля. С учетом того, что концентрация точечных дефектов в определенных зонах будет увеличиваться с увеличением флюенса, локализация и накопление таких дефектов будут происходить в областях, где ионы имеют наименьшую энергию и окончательно тормозятся. При превышении концентраций накопленных дефектов некоторого определенного значения и их коагуляции в таких областях будут происходить разрушение структуры и аморфизация отдельных областей нанотрубок. Впоследствии эти зоны становятся более подверженными внешним воздействиям и могут разрушаться вследствие механической или химической обработки. Так,

на рисунке 3 представлено РЭМ изображение нанотрубки, облученной с наибольшей дозой, после удаления полимерного шаблона.

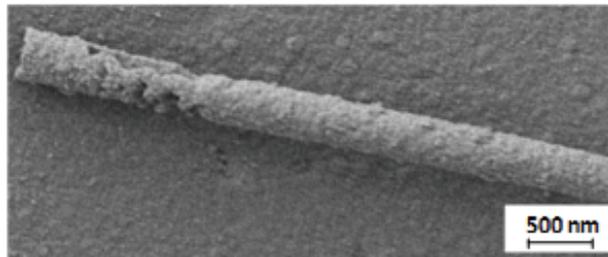


Рисунок 3 – РЭМ-изображение разрушенной структуры Zn нанотрубки, полученной для образца, облученного ионами Ar^{8+} с дозой 5×10^{11} ion/cm²

Figure 3 – SEM-image of the destroyed structure of a Zn nanotube obtained for a sample irradiated with Ar^{8+} ions with a dose of 5×10^{11} ion/cm²

Для потенциального практического применения наноструктур в качестве основы для устройств микроэлектроники одной из важных характеристик является удельная проводимость (σ), которую для массивов нанотрубок рассчитывали по формуле (2):

$$\sigma = \frac{dI}{dU} \frac{l}{A}, \quad (2)$$

где l – длина нанотрубок; A – площадь; dI/dU – тангенс угла наклона $I-U$. На рисунке 4 представлен график зависимости удельной проводимости

Zn нанотрубок от дозы облучения. Погрешность измерений составляет не более 3 %.

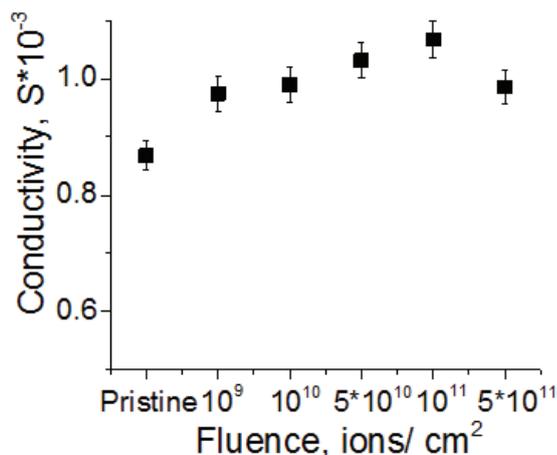


Рисунок 4 – График зависимости проводимости образцов Zn нанотрубок от дозы облучения

Figure 4 – Graph of the change in conductivity of Zn nanotubes samples from the radiation dose

Как видно из рисунка 4, модификация кристаллической структуры ионами Ar^{8+} влечет изменение проводящих свойств. При росте дозы облучения проводимость увеличивается. После достижения критического значения 5×10^{11} ион/см², при котором происходит разрушение структуры, наблюдается уменьшение электропроводности. Ионизирующее облучение, являясь причиной радиационного отжига дефектов, приводит к увеличению электропроводности массива нанотрубок. Накопление дефектов, вызывающее разрушение структуры при больших дозах облучения, снижает проводимость.

Таким образом, определена зависимость электропроводности массивов Zn нанотрубок от дозы ионизирующего облучения. Также установлена критическая доза, превышение которой приводит к деградации наноструктурного материала и утрате электропроводящих свойств. Несмотря на это, достаточно высокие значения проводимости образцов позволяют рассматривать массивы Zn нанотрубок в качестве основы для элементов электроники, функционирующих в пределах определенной дозы облучения.

Заключение

Проведено исследование влияния облучения ионами Ar^{8+} с энергией 1,75 МэВ/нукл и дозой от 1×10^9 до 5×10^{11} ион/см² на структуру и электропроводность массивов Zn нанотрубок диаметром 380 нм, синтезированных методом электрохимического осаждения в порах трековых мембран. В результате направленной модификации нанотрубок наблюдается незначительное увеличение параметров элементарной ячейки, что может быть обусловлено отжигом дефектов и рекристаллизацией. При этом увеличивается электропроводность образцов вплоть до доз 10^{11} ион/см², после чего электропроводящие характеристики ухудшаются за счет появления локальных высокодефектных зон и разрушения структуры. Таким образом, установлена критическая доза, превышение которой приводит к деградации наноструктурного материала и утрате физических свойств. Несмотря на это, достаточно высокие значения проводимости образцов позволяют рассматривать синтезированные массивы нанотрубок в качестве основы для элементов электроники, функционирующих в пределах определенной дозы облучения.

References

1. Kaur A., Chauhan R.P. Modifications induced by silicon and nickel ion beams in the electrical conductivity of zinc nanowires. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2013, vol. 24, no. 11, pp. 4302–4310. **doi:** 10.1007/s10854-013-1402-0
2. Ronning C., Borschel C., Geburt S., Niepelt R. Ion beam doping of semiconductor nanowires. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 2010, vol. 70, no. 3–6, pp. 30–43. **doi:** 10.1016/j.mser.2010.07.002
3. Chauhan R.P., Gehlawat D., Kaur A. Ion beam fluence induced variation in optical band-gap of ZnO nanowires. *Journal of Experimental Nanoscience*, 2014, vol. 9, no. 8, pp. 871–876. **doi:** 10.1080/17458080.2012.736639
4. Gehlawat D., Chauhan R.P. Swift heavy ions induced variation in the electronic transport through Cu nanowires. *Materials Chemistry and Physics*, 2014, vol. 145, no. 1–2, pp. 60–67. **doi:** 10.1016/j.matchemphys.2014.01.033
5. Chauhan R.P., Rana P. Effect of O⁵⁺ ion implantation on the electrical and structural properties of Cu nanowires. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2014, vol. 302, no. 2, pp. 851–856. **doi:** 10.1007/s10967-014-3262-3
6. Dhara S. Formation, dynamics, and characterization of nanostructures by ion beam irradiation. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2007, vol. 32, no. 1–2, pp. 1–50. **doi:** 10.1080/10408430601187624
7. Park S.K., Hong Y.K., Lee Y.B., Bae S.W., Joo J. Surface modification of Ni and Co metal nanowires through MeV high energy ion irradiation. *Current Applied Physics*, 2009, vol. 9, no. 4, pp. 847–851. **doi:** 10.1016/j.cap.2008.07.021
8. Rana P., Narula C., Rani A., Chauhan R.P., Gupta R., Kumar R. Ion implantation effects of negative oxygen on copper nanowires. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, vol. 28, no. 14, pp. 9998–10006. **doi:** 10.1007/s10854-017-6757-1
9. Kumari M., Rana P., Chauhan R.P. Modifications in structural and electrical properties of gamma irradiated CdSe nanowires. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2014, vol. 753, pp. 116–120. **doi:** 10.1016/j.nima.2014.03.062
10. Shlimas D.I., Kozlovskiy A.L., Zdorovets M.V., Mashentseva A.A., Kadyrzhanov K.K. Changes in structural and conducting characteristics of zinc nanotubes by bombardment with Xe⁺²² heavy ions. *High Energy Chemistry*, 2017, vol. 51, no. 1, pp. 14–19. **doi:** 10.1134/S0018143916060175
11. Korolkov I. V., Gorin Y.G., Yeszhanov A.B., Kozlovskiy A.L., Zdorovets M.V. Preparation of PET track-etched membranes for membrane distillation by photo-induced graft polymerization. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, vol. 205, pp. 55–63. **doi:** 10.1016/j.matchemphys.2017.11.006