

СТАБИЛЬНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОПРОВОЛОК ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИОННЫХ ПУЧКОВ

С.А. Бедин¹⁾, В.В. Овчинников^{1, 2)}, Н.В. Гущина¹⁾, Г.Е. Ремнев³⁾,
С.К. Павлов^{1, 3)}, Н.Н. Герасименко^{1, 4)}, Д.Л. Загорский^{1, 5)}

¹⁾Институт электрофизики УрО РАН,

ул. Амундсена 106, 620016 Екатеринбург, Россия, bserg5@gmail.com

²⁾Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
ул. Мира 19, 620002 Екатеринбург, Россия

³⁾НИИ высоких напряжений ТПУ, пр. Ленина 30, 634050 Томск, Россия

⁴⁾Московский институт электронной техники,
пл. Шокина 1, 124498 Москва, Зеленоград, Россия

⁵⁾Институт кристаллографии имени А.В. Шубникова

ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Ленинский пр. 59, 119333 Москва, Россия

Работа посвящена радиационной стабильности никелевых и железо-никелевых нанопроволок, полученных методом шаблонного синтеза на базе полимерных трековых мембран. Нанопроволоки облучали в непрерывном режиме ионами Ar^+ и He^+ ($E=20$ кэВ, $j = 300$ мкА/см²) и импульсным режиме ионами $85\%C^+ + 15\%H^+$ ($E = 250$ кэВ, $j = 100$ А/см², $t = 90$ нс). Исследована зависимость стабильности нанопроволок от их диаметра, а также энергии, флюенса облучения и типа внедряемых ионов. Сделано предположение о важной роли термализованных областей плотных каскадов атомных смещений (thermal spikes), являющихся наноразмерными зонами взрывного энерговыделения, разогреваемыми до нескольких тысяч градусов, в видоизменении структуры НП.

Введение

В последние годы наблюдается возрастающий интерес к получению, исследованию и применению различных наноразмерных материалов. Один из таких материалов – массивы одномерных металлических структур – нанопроволок (НП). Массивы НП из меди и серебра представляют интерес как эмиттеры электронов (холодные катоды) и ионов, а НП из материалов группы железа перспективны как магнитные материалы (сенсоры, материалы для магнитной записи с высокой плотностью).

К числу особенностей получаемых массивов НП относится их измененная стабильность. Так, известно [1], что измененная геометрия и развитая поверхность приводят к их меньшей (по сравнению с объемными аналогами) химической и термической стабильности. По предварительным данным, такие массивы имеют и измененную радиационную стабильность. Интерес к изучению радиационной стабильности обусловлен, по меньшей мере, двумя факторами:

- радиационная обработка является одним из способов модификации, управления свойствами таких НП;
- радиационная стойкость – сохранение заданных свойств при различных типах радиационных воздействий – во многих случаях является одной из важных эксплуатационных характеристик.

Отметим также, что вопросы влияния ионизирующих излучений на структуру НП представляют не только практический, но и теоретический интерес. Кроме того, важно, что, если проблемами радиационного воздействия на объемные металлы занимаются достаточно давно, то для наноразмерных структур исследований очень мало. Основная часть этих исследований посвящена материалам с наноразмерными зёрнами. Например, работа [1], где отмечено, что особенностью наноразмерных структур может быть невозмож-

ность накопления радиационных дефектов из-за того, что такие дефекты могут сразу выходить на поверхность.

Основная часть

В настоящей работе были исследованы некоторые аспекты радиационной стабильности НП из магнитных 3d-металлов: чистого никеля и сплава FeNi. НП были получены методом шаблонного синтеза. В качестве матрицы-шаблона были использованы промышленные трековые мембраны с диаметром пор 60 и 100 нм, производства ОИЯИ, г. Дубна. Подробно этапы процесса НП осаждения описаны в работах [2, 3].

Облучение НП проводилось в непрерывном и импульсном режимах.

Облучение в непрерывном режиме проводилось ионами Ar^+ и He^+ на установке ИЛМ-1, оснащенной технологическим ионным источником «ПУЛЬСАР-1М» на основе тлеющего разряда низкого давления с холодным полым катодом, обеспечивающем работу в непрерывном и импульсно-периодическом (миллисекундном) режиме ($S_{пучка} \sim 100$ см², $E = 5-50$ кэВ, $j = 10-500$ мкА/см², $f = 50$ Гц) [4].

Облучение «щеток» из НП осуществлялось на вращающемся держателе, направление облучения 45° к поверхности подложки; $E = 20$ кэВ, $j = 300$ мкА/см², скорость вращения 8 об/мин. Флюенс от 10^{14} до 10^{18} см⁻² набирали в несколько приемов во избежание нагрева образцов, нагрев под воздействием пучка не превышал 150°C . Так же проводилось облучение с нагревом образца пучком до 550°C .

Облучение в импульсном режиме проводилось единичным импульсом длительностью $t = 90$ нс, ионами $85\%C^+ + 15\%H^+$ на установке ТЕМП-4 (НИИ высоких напряжений, Томский политехнический университет, г. Томск), $E = 250$ кэВ, $j = 100$ А/см². Флюенс за один импульс – $F = 0.5 \cdot 10^{14}$ см⁻² [5].

После облучения образцы исследовали на растровом электронном микроскопе FEI Scious.

При облучении непрерывными пучками ионами Ar^+ без нагрева (не более 150°C) дозами менее 10^{16} см^{-2} наблюдаемые изменения были отнесены к незначительным. При флюенсе 10^{17} см^{-2} замечены оплавления макушек НП. При увеличении флюенса до $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ область оплавления доходит до половины снопа НП, что хорошо видно на микрофотографиях (рис. 1). Кроме того, наблюдается распыление материала НП. При последующем накоплении флюенса происходит дальнейшее оплавление и деформация НП. При непрерывном облучении с нагревом (5 минут) происходит оплавление поверхности всего снопа проволок (рис. 2а). При этом внутри снопа проволоки менее оплавлены.

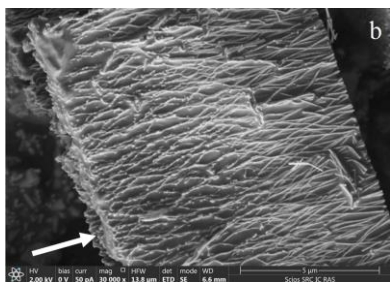


Рис. 1. Микрофотография НП из Ni диаметром 60 нм после облучения ионами Ar^+ с нагревом до 150°C . $F = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$

На рис. 2 и 3 приводится сравнение НП после облучения ионами Ar^+ и ионами Xe^+ . В обоих случаях режим облучения был одинаковым: $E = 20 \text{ кэВ}$, $j = 300 \text{ мкА/см}^2$, нагрев 550°C . Облучение проводилось непрерывно в течение 5 минут. На изображении видно, что после облучения ионами Xe^+ проволоки заметно деформированы и имеют явные отличия по сравнению с облучением ионами Ar^+ .

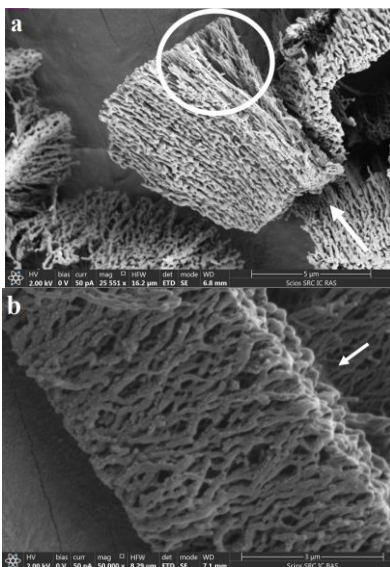


Рис. 2. Микрофотография НП из Ni диаметром 60 нм после облучения ионами Ar^+ (а) и Xe^+ (б) с нагревом до 550°C . $F = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$

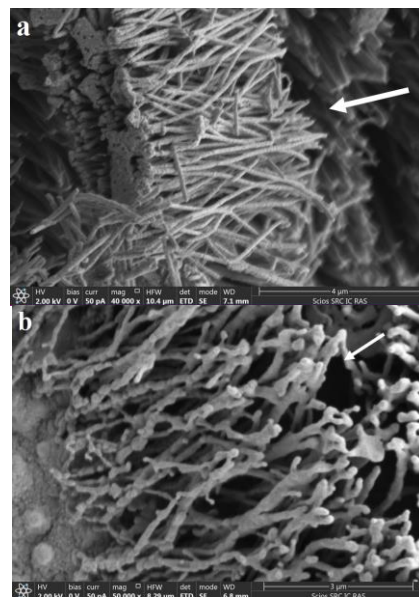


Рис. 3. Микрофотография НП из сплава $\text{Fe}_{0.56}\text{Ni}_{0.44}$ диаметром 100 нм после облучения ионами Ar^+ (а) и ионами Xe^+ (б) с нагревом до 550°C . $F = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$

На рис. 4 приводится фото НП из никеля диаметром 60 нм после импульсного облучения. На поверхности НП наблюдаются оплавления и разрывы, которые, по всей видимости, возникли в процессе локального разогрева, а также динамического воздействия мощных послекаскадных волн [6] при прохождении ионов.

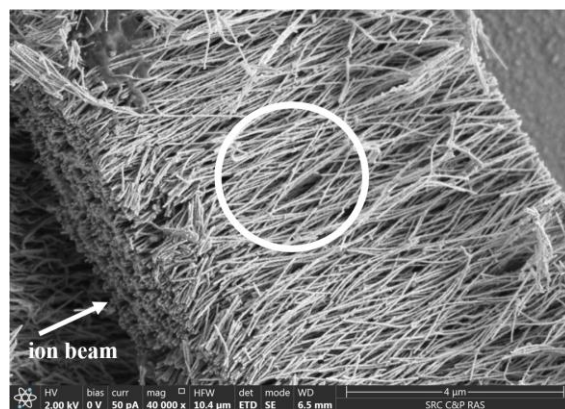


Рис. 4. Микрофотография НП из сплава $\text{Fe}_{0.56}\text{Ni}_{0.44}$ диаметром 60 нм после облучения ионами $85\%\text{C}^+ + 15\%\text{N}^+$ в импульсном режиме ($E=250 \text{ кэВ}$, $j=200 \text{ А/см}^2$, $t_{\text{импульса}} = 90 \text{ нс}$)

Объяснить наблюдаемый процесс оплавления НП при недостаточных для плавления чистого никеля и железо-никелевого сплава температурах (150 и 550°C) можно явлением формирования при облучении тяжелыми ионами термических пиков (thermal spikes). Это почти сферические (в случае внедрения тяжелых ионов в тяжелые матрицы) области плотных каскадов атомных смещений с типичным диаметром $\sim 5\text{-}10 \text{ нм}$ (порядка 11 нм для Ar^+ и 6 нм для Xe^+ [TRIM]), термализуемые за время порядка 10^{-12} с (время остывания $\sim 10^{-11} \text{ с}$) и достигающие температур $3000\text{-}5000 \text{ К}$ и

выше. Средняя глубина формирования таких областей при энергии рассматриваемых ионов составляющей 20 кэВ также порядка 5-10 нм. В работе [6] обосновывается роль послекаскадных ударных либо мощных упругих волн (оценки тепловых давлений в термализованных каскадах показывают, что они могут достигать нескольких десятков ГПа [7]), чем могут быть обусловлены деформации и расщепления НП.

Поскольку в случае Xe^+ энерговыделение в расчете на атом каскада значительно выше, чем для Ar^+ [TRIM], рис. 2 и 3 демонстрируют более существенное искривление нанопроволок с образованием узлов (почек) и даже веток при облучении ионами Xe^+ , вследствие возможного процесса выплескивания материала НП из областей термических пиков наружу. Не исключена вероятность оседания расплавленного металла на соседние нанопроволоки. Было обнаружено, что при облучении в непрерывном режиме ($E = 20 \text{ кэВ}$, $j = 300 \text{ мкА/см}^2$) в течение 5 минут и более (нагрев образца порядка 500°C) и флюенсах 10^{17} - 10^{18} см^{-2} происходит сплавление НП в области их контакта.

Закключение

Проведенное исследование показало, что при использованных параметрах облучения как ионами Ar^+ и, так и ионами Xe^+ ($E = 20 \text{ кэВ}$, $j = 300 \text{ мкА/см}^2$, флюенсы $10^{16} - 10^{18} \text{ см}^{-2}$) происходит деформация и оплавление НП, даже при незначительном нагреве пучком (до 150°C). Воздействие ионов Xe^+ более интенсивное.

Действие однократного импульсного пучка ионов $85\%\text{C}^+ + 15\%\text{H}^+$ в использованном режиме (без тотального оплавления поверхностного слоя металла) в целом аналогично действию непрерывных пучков ионов. Оно, вероятно, связано с описанной выше ролью индивидуальных плотных каскадов атомных смещений, создаваемых более тяжелыми ионами углерода (с энергией 250 кэВ) по всему объему НП, в том числе и вблизи поверхности.

Можно сделать вывод о низкой радиационной стабильности НП при использованных режимах облучения ионами Ar^+ и Xe^+ под воздействием ионного облучения с высокой плотностью ионного тока. В дальнейшем представляет интерес более детальные сравнительные исследования влияния химического состава, геометрических характеристик нанопроволок, энергии ионов, а также сорта внедряемых ионов на радиационную стабильность.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10054).

Список литературы

1. Андриевский Р.А. Наноструктуры в экстремальных условиях // УФН. 2014. Т. 184. № 10. С. 1017-1032.
2. Бедин С.А., Рыбалко О.Г., Поляков Н.Б., Загорский Д.Л., Разумовская И.В., Бондаренко Г.Г., Олейников В.А. Металлические микро- и нанопроволоки, получение методом матричного синтеза и их применение в масс-спектрометрии // Перспективные материалы. 2010. № 1. С. 98-104.
3. Zagorskiy D.L., Korotkov V.V., Frolov K.V., Sulyanov S.N., Kudryavtsev V.N., Kruglikov S.S., Bedin S.A. Track Pore Matrixes for the Preparation of Co, Ni and Fe Nanowires: Electrodeposition and their Properties // Physics Procedia. 2015. V. 80. P. 144-147.
4. Гаверилов Н.В., Никулин С.П., Радковский Г.В. Источники интенсивных широких пучков ионов газов на основе разряда с полым катодом в магнитном поле // ПТЭ. 1996. № 1. С. 93-98.
5. Remnev G.E., Ivanov Yu.F., Opekunov M.S., Puzyrevich A.G. Defect formation in steel under single and periodical actions of powerful pulsed beams // Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki. 1995. V. 21. № 34. P. 60-65.
6. Овчинников В.В. Радиационно-динамические эффекты. Возможности формирования уникальных структурных состояний и свойств конденсированных сред // Успехи физических наук. 2008. Т. 178. № 9. С. 991-1001.
7. Ovchinnikov V.V., Makhin'ko F.F., Solomonov V.I., Thermal-spikes temperature measurement in pure metals under argon ion irradiation ($E = 5-15 \text{ keV}$) // Journal of Physics: Conference Series. 2015. 652 012070.2. Петров А.И. // Перспективные материалы. 2010. № 4. С. 5-9.

STABILITY OF METAL NANOWIRES UNDER THE INFLUENCE OF ION BEAMS

S.A. Bedin¹⁾, V.V. Ovchinnikov^{1, 2)}, N.V. Gushchina¹⁾,
G.E. Remnev³⁾, S.K. Pavlov³⁾, N.N. Gerasimenko^{1, 4)}, D.L. Zagorskiy^{1, 5)}

¹⁾Institute of Electrophysics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
106 Amundsena str., 620016 Yekaterinburg, Russia

²⁾El'tsin Ural Federal University, 19 Mira str., 620002 Yekaterinburg, Russia

³⁾Research Institute of High Voltage, 30 Lenina ave., 634050 Tomsk, Russia

⁴⁾National Research University of Electronic Technology (MIET),
1 pl. Shokina, Zelenograd, 124498 Moscow, Russia

⁵⁾Shubnikov Institute of Crystallography of Federal Scientific Research Center "Crystallography and Photonics" of Russian Academy of Sciences, 59 Leninsky ave., 119333 Moscow, Russia

The aim of this work is to investigate the radiation stability nickel and iron–nickel alloy nanowires fabricated by matrix synthesis using polymer track membranes. Nanowire irradiation with continuous Ar^+ and Xe^+ ($E = 20 \text{ keV}$, $j = 300 \text{ μА/см}^2$) ion beams and under exposure to powerful pulsed $85\%\text{C}^+ + 15\%\text{H}^+$ ion beam with the generation of only one pulse ($E = 250 \text{ keV}$, $j = 100 \text{ А/см}^2$, $t = 90 \text{ ns}$). The dependence of the stability of nanowires on their diameter, fluence, and type of implanted ions is investigated. The assumption that the thermalized regions of dense cascades of atomic displacements (thermal spikes) play an important role in the nanowire structure change is made. These regions are nanosized zones of explosive energy release and heated to several thousands of degrees.