

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ТРУДЫ

XXVIII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА»

(Севастополь, 9-14 июля 2018 г.)

под редакцией заслуженного деятеля науки РФ,
д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г.

Москва – 2018

УДК 669.
ББК 22.38
Р15
ISBN 978-5-89671-023-3

Труды XXVIII Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, 9 – 14 июля 2018 г.), под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г., М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2018 г., 522с.

В рамках конференции проводилась XXII Международная школа молодых учёных «Радиационная физика твёрдого тела».

Редакционная коллегия:

д.ф.-м.н. Бондаренко Г.Г. (ответственный редактор),
к.т.н. Гавриш В.М. (Севастопольский Государственный университет),
Шалковская Н. А. (Севастопольский Государственный университет),
д.ф.-м.н. Кристя В.И.,
к.ф.-м.н. Гайдар А.И.,
к.ф.-м.н. Дьячкова И.Г.,
Смирнова Е.В.
к.т.н. Шахбазов С.Ю.

УДК 669.
ББК 22.38
© Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2018

ISBN 978-5-89671-023-3

© Труды XXVIII Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела»

ПРОГРАММА-СОДЕРЖАНИЕ

Понедельник, 9 июля**10.00-14.00****Открытие конференции - Бондаренко Г.Г.**

1. Рогожкин С.В., Никитин А.А., Хомич А.А., Искандаров Н.А., Хорошилов В.В., Лукьянчук А.А., Разницын О.А., Шутов А.С., Федин П.А., Кулевой Т.В., Васильев А.Л., Пресняков М.Ю. «Исследование микроскопических причин радиационного упрочнения стали Eurofer 97 с помощью имитационного облучения ионами»	11
2. Волков Н.В., Олейников И.В., Сысоева Н.В., Сафонов Д.А., Яшин С.А. «Влияние состояния кремниевой подложки и режимов ионно-пучковой обработки на размерные параметры элементов микроэлектронных механических систем»	21
3. Овчинников В.В. «О незатухающем режиме распространения уединенных волн, осуществляющих структурно-фазовые превращения в метастабильных средах»	30
4. Бондаренко Г.Г., Кристя В.И., Мьо Ти Ха «Расчет напряжения зажигания слаботоочного газового разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки»	35
5. Стальцов М.С., Чернов И.И., Калин Б.А., Беляев А.А., Гордеев А.В., Шестакова В.М., Болат-оол А.А., Кузнецова Т.В., Лебедев В.В. «Газовая пористость вдоль пробега ионов в ванадии и его сплавах при последовательном облучении ионами гелия и водорода»	40
6. Korolev A.A., Kozlov S.A., Stumpf S.A., Golovanev Y.S. «Antireflection effect of electronic nonlinearity inertia in violet range for few-cycle laser beams at transparent isotropic dielectric media boundary»	50

14.00-15.00 Перерыв.**15.00-17.00 Секция “Радиационная физика металлов” (заседание школы молодых ученых)**

1. Шиманский В.И., Углов В.В., Черенда Н.Н., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М., Медин А.А. «Структурные изменения в циркониевом сплаве, легированном хромом и ниобием в результате воздействия компрессионными плазменными потоками»	61
--	----

2. Долуденко И.М., Шаталов А.С., Жигалина О.М., Хмеленин Д.Н., Артёмов В.В., Бедин С.А., Бондаренко Г.Г., Загорский Д.Л., Фролов К.В., Перунов И.В. «Применение ядерных фильтров для получения слоевых нанопроволок»	70
3. Шаталов А.С., Бондаренко Г.Г., Чигарев С.Г., Дюжиков И.Н., Загорский Д.Л., Долуденко И.М., Артемов В.В. «Создание спин-инжекторного источника терагерцового излучения на основе массива нанопроволок из ферромагнитных металлов»	78
4. Черкасов Д.А., Долуденко И.М., Бондаренко Г.Г., Артёмов В.В., Загорский Д.Л. «Влияние магнитного поля на структуру нанопроволок, получаемых репликацией пор трековых мембран»	85
5. Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Горелова Е.Г., Каширина Н.В., Петров В.С. «Механизмы формирования слоя ВаО на поверхности прессованного Pd-Ва катода магнетрона с беззнакальным запуском»	93
6. Казенов К.Б., Познырев Е.Н. «Применение времяпролетной позитронной аннигиляционной спектроскопии для исследования изменения физико-химических свойств материалов под воздействием экстремальных факторов окружающей среды»	105
7. Казенов К.Б. «Экспериментальное определение потока быстрых нейтронов у внешней поверхности корпуса ядерного реактора типа ВВЭР-1000 при увеличенной топливной загрузке»	111

Вторник, 10 июля

9.00-14.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов”

1. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Костюк В.И., Шишов К.А. «Исследования стекла К-208, облученного электронами и протонами средних энергий»	117
2. Арутюнян В.В., Ерицян Г.Н., Григорян Н.Е., Саакян А.А., Цаканов В.М., Григорян Б.А. «Радиационно-стимулированное дефектообразование при облучении кристаллов кремния пикосекундными электронами»	127
3. Арутюнян В.В., Алексанян Е.М., Акопян Н.А., Арестакян А.Г., Бадалян А.О., Григорян Н. Е., Баграмян В.В., Саркисян А.А. «Радиационная стойкость новых композитных терморегулирующих покрытий»	138

4. Гынгазов С.А., Костенко В., Шевелев С.А., Купчишин А.И. «Модифицирование прочностных свойств оксидных материалов ионным облучением»	147
5. Милёхин Ю.М., Коптелов А.А., Коптелов И.А., Рогозина А.А. «Необратимые изменения теплофизических характеристик полимерных материалов при гамма-облучении»	155
6. Медведева И.Ф., Мурин Л.И., Маркевич В.П. «Формирование комплексов C_s-C_s и VO при отжиге E-центров в облученных кристаллах n-Si»	163
7. Макаренко Л.Ф., Ластовский С.Б., Якушевич А.С., Мурин Л.И., Крылов В.П., Татмышевский К.В. «Инжекционно-стимулированные реакции образования бистабильных дефектов в кремнии p-типа, облученном α -частицами»	170

14.00-15.00 Перерыв.**15.00-17.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов” (заседание школы молодых ученых)**

1. Дьячкова И.Г., Гурьева П.В, Монахов И.С., Новоселова Е.Г., Шахбазов С.Ю., Шупегин М.Л. «Исследование структуры нанокompозитных танталсодержащих кремний-углеродных пленок»	179
2. Толкачева Е.А., Мурин Л.И., Маркевич В.П. «Особенности процессов радиационного дефектообразования при облучении быстрыми электронами кристаллов Si, содержащих вакансионно-кислородные комплексы»	185
3. Мадатов Р.С., Асадов Ф.Г. «Радиационные эффекты в кристаллах GaS и GaS<YB>»	193
4. Мадатов Р.С., Джахангиров М.М., Фараджова У.Ф., Гаджиева С.А. «Применение метода комбинационного рассеяния света в кристаллах GaS и GaSe до и после ионного внедрения водорода с энергией 70 кэВ»	195
5. Мадатов Р.С., Нуриев И.Р., Мамедов М.А., Мамишова Р.М. «Исследование влияния γ -излучения на фотоэлектрические свойства эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Mn_xSe$ »	198
6. Файзуллаев Б.С., Исламов А.Х. «Инфракрасные спектры кварцевого стекла КУ-1, облученного быстрыми нейтронами»	201

Среда, 11 июля**9.00-14.0 Секция “Радиационная физика металлов”**

1. Волков Н.В., Олейников И.В., Корневский Е.Л., Сафонов Д.А., Яшин С.А. «Применимость моделей ионного перемешивания для условий облучения систем «пленка-подложка» пучками ионов с широким энергетическим спектром»	203
2. Загорский Д.Л., Фролов К.В., Ломов А.А., Чуев М.А., Долуденко И.М., Шаталов А.С., Черкасов Д.А., Бедин С.А., Артёмов В.В., Панов Д.В. «Магнитные свойства нанопроволок из железа, никеля и кобальта, получаемых темплатным методом на основе трековых мембран»	213
3. Бакиева О.Р., Аверкиев И.К., Сурнин Д.В., Немцова О.М. «Исследование локальной атомной структуры поверхности 3d-металлов методом EELFS спектроскопии»	217
4. Быков П.В., Воробьёв В.Л., Тарасенков А.Н., Баянкин В.Я. «Формирование химического состава поверхностных слоёв титана, с напыленным слоем алюминия, методом ионно-лучевого перемешивания»	225
5. Портных И.А., Козлов А.В., Панченко В.Л. «Эволюция радиационной пористости в стали X18H9 при нейтронном облучении»	231
6. Кинев Е.А. «Размер зерна как монитор качества аустенитной стали с повышенной стойкостью к распуханию»	239
7. Углов В.В., Злоцкий С.В., Подобед А.Д. «Эрозия поверхности нанокompозитных пленок ZrSiN, облученных ионами гелия»	248

14.00-15.00 Перерыв.**15.00-17.00 Секция «Физические основы радиационной технологии» (заседание школы молодых учёных)**

1. Чирская Н.П., Золотарев И.А., Тулупов В.И., Новиков Л.С., Оседло В.И. «Моделирование метрологических характеристик спектрометров заряженных частиц»	259
2. Епифанов Н.А., Грибков В.А., Дёмин А.С., Казилин Е.Е., Латышев С.В., Масляев С.А., Миньков К.Н., Морозов Е.В., Пименов В.Н., Сасиновская И.П., Сиротинкин В.П., Падух М. «Особенности деградации керамического покрытия из оксида Al_2O_3 на алюминиевой подложке при импульсном пучково-	269

плазменном и лазерном воздействии»	
3. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Андреев В.В., Столяров А.А., Романов А.В. «Моделирование зарядовых явлений в МДП-структурах при сильнополевой инжекции электронов и воздействии ионизирующих излучений»	280
4. Ахмелкин Д.М., Андреев В.В., Бондаренко Г.Г. «Исследование инжекционно- и радиационно-термических процессов в диэлектрических пленках МДП-структур»	288
5. Козлова М.В., Шаталов Н.С., Козлов С.В., Павленко В.И., Едаменко О.Д. «Адсорбция радона на шунгите»	298
6. Клименко Д.И., Шаталов Н.С., Козлов С.В., Павленко В.И., Едаменко О.Д. «Наномодифицирование бетонов»	303
7. Горелова Е.Г. «Влияние нанесенной методом ионно-плазменного напыления поверхностной пленки осмия на эмиссионные свойства вольфрам-алюминатного катода»	307

Четверг, 12 июля**10.00-14.00 Секция “Физические основы радиационной технологии”**

1. Мадатов Р.С., Алекперов А.С., Набиев А.Э. «Влияние гамма-лучей на кристаллическую структуру монокристаллов $Ge_{0.995}Ln_{0.005}S$ »	312
2. Воробьев В.Л., Колотов А.А., Ульянов А.Л., Гильмутдинов Ф.З., Баянкин В.Я., Быков П.В., Быстров С.Г. «Формирование наноразмерных поверхностных слоев титанового сплава методом ионно-лучевого перемешивания углерода»	315
3. Воробьев В.Л., Гильмутдинов Ф.З., Баянкин В.Я., Быков П.В. «Формирование наноразмерных поверхностных слоев медно-никелевого сплава $Cu_{50}Ni_{50}$ ионной имплантацией кислорода»	323
4. Понарядов В.В., Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Горушко В.А., Омельченко А.А. «Быстрый термический отжиг как метод улучшения электрических параметров подзатворного диэлектрика»	329
5. Саидахмедов К.Х., Нуритдинов И. «Влияние ионизирующего излучения на люминесцентные свойства кристаллов BGO»	337
6. Гарькуша М. В., Шешин Е. П. «Автоэмиссионный катод нового типа»	346

14.00-15.00 Перерыв.**15.00-17.00 Секция «Радиационная физика неметаллических материалов»**

1. Белько В.И., Гусаков В.Е., Дорожкин Н.Н. «Исследование радиационной стойкости наноразмерных структур методом молекулярной динамики»	348
2. Кабышев А.В., Конусов Ф.В., Павлов С.К. «Оптические свойства пленок нитридов алюминия и кремния, облученных ионами углерода в режиме высокоинтенсивной короткоимпульсной имплантации»	352
3. Курбанов А.М. «Роль примесей и структурных дефектов в образовании радиационных центров окраски в кристаллах $\text{Ca}_3(\text{Nb,Ga})_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ »	362
4. Мадатов Р.С., Тагиев Т.Б., Халыгзаде А.Ш. «Радиационные эффекты в облученных гамма - квантами монокристаллах $\text{GaS}\langle\text{Er}\rangle$ »	369
5. Пискарев М.С., Гильман А.Б., Кечекьян А.С., Кузнецов А.А. «Влияние модифицирования в низкотемпературной плазме на адгезионные свойства полимеров»	371

Пятница, 13 июля**10.00-14.00 Секция «Физические основы радиационной технологии»**

1. Ибрагимова Э.М., Муссаева М.А., Сандалов В.Н., Амонов М.З., Бузриков Ш.Н. «Поверхностная электропроводность кристаллов LiF, облученных электронами»	375
2. Асадчиков В.Е., Бузмаков А.В., Дьячкова И.Г., Золотов Д.А., Чуховский Ф.Н. «Определение пространственной ориентации линейных дефектов кристаллической решетки методом рентгеновской дифракционной микротомографии»	384
3. Бузмаков А.В., Асадчиков В.Е., Золотов Д.А., Рошин Б.С., Дымшиц Ю.М., Шишков В.А., Чукалина М.В., Ингачева А.С., Кривонос Ю.С., Дьячкова И.Г. «Конструкция нового автоматизированного лабораторного рентгеновского микротомографа»	390
4. Асадчиков В.Е., Бузмаков А.В., Дьячкова И.Г., Золотов Д.А., Кривонос Ю.С., Пантюшов В.В., Сайфутдинов Р.Г. «Исследования конкрементов желчного пузыря человека методом рентгеновской микротомографии»	396
5. Гынгазов С.А., Костенко В., Овчинников В.В., Гущина Н.В., Махинько Ф.Ф. «Влияние ионного облучения на	403

механические свойства алюмооксидной керамики»	
6. Селищев П.А., Боков П.М. «Влияние параметров приповерхностного теплового импульса на неоднородный отжиг радиационных дефектов»	411

14.00-15.00 Перерыв.**15.00-17.0 Секция «Радиационная физика металлов»**

1. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Крысина О.В., Денисов В.В., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Шугуров В.В., Толкачев О.С. «Структурно-фазовые превращения и свойства алюминия, подвергнутого азотированию в плазме несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления»	420
2. Голубев О.Л. «Особенности конденсации слоев кремния на поверхности монокристалла вольфрама»	428
3. Гущина Н.В., Овчинников В.В., Махинько Ф.Ф., Кайгородова Л.И., Распосиенко Д.Ю. «Влияние вылеживания при комнатной температуре и последующего ионного облучения на структуру сплава 1441 (Al-Li-Cu-Mg), подвергнутого мегапластической деформации»	435
4. Новиков Л.С., Ермолаев И.К., Чирская Н.П. «Повреждение металлических материалов ударами техногенных космических частиц»	445
5. Боровицкая И.В., Коршунов С.Н., Мансурова А.Н., Парамонова В.В., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Казилин Е.Е. «Особенности изменения топографии поверхности ванадия в условиях отдельного и последовательного воздействия ионов аргона и импульсного лазерного излучения»	455

Суббота, 14 июля**9.00**

1. Овчинников В.В. «Тепловое излучение, взаимодействие заряженных частиц, гравитационное взаимодействие. Мировые физические константы»	464
2. Оксенгендлер Б.Л., Ашуров Х.Б., Максимов С.Е. «Современные тренды в радиационной физике твердого тела («магический квадрат»)»	477
3. Ерофеев В.Т., Урбанович А.И. «Моделирование взаимодействия электромагнитного излучения со средой с пространственной дисперсией, содержащей сфероидальные	481

частицы»	
4. Галанина Л.И., Новиков Л.С. «Моделирование радиационных эффектов в современных элементах микроэлектроники»	491
Обсуждение докладов	
Общая дискуссия	
Закрытие конференции	

ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОЕВЫХ НАНОПРОВОЛОК

Долуденко И.М.^{1,2}, Шаталов А.С.^{1,2}, Жигалина О.М.², Хмеленин Д.Н.²,
Артёмов В.В.², Бедин С.А.^{2,3}, Бондаренко Г.Г.¹, Загорский Д.Л.²,
Фролов К.В.², Перунов И.В.²

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа
экономики», (101100, Талинская д. 34, Москва, Россия)

² ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
(119333, Ленинский пр. 59, Москва, Россия)

³ Московский педагогический государственный университет,
(119991, ул. Малая Пироговская, дом 1, строение 1, Москва, Россия
doludenko.i@yandex.ru)

Аннотация

В представляемой работе предложен способ определения режима получения одномерных гетероструктур методом матричного синтеза. Получены нанопроволоки из чередующихся слоёв меди и никеля и проведено исследование их структуры методами ПЭМ, РЭМ и рентгеноструктурного анализа.

Введение

Радиационные технологии в настоящее время активно развиваются и имеют огромное количество областей применения. Одно из таких применений – это создание трековых мембран (ядерных фильтров). Такие мембраны могут использоваться как для целей фильтрации, так и для матричного синтеза. Суть последнего состоит в возможности направленного заполнения пор матрицы требуемым веществом.

Отметим, что в последние годы стали широко изучаться наноструктурированные материалы, в том числе композиционно-модулированные сплавы. Эти материалы, с толщиной отдельных слоёв менее 100 нм, обладают весьма интересными свойствами, недостижимыми в объёмных материалах. Метод матричного синтеза, с использованием трековых мембран в качестве матрицы, позволяет получать такие структуры в виде тонких стержней (нанопроволок), состоящие из таких чередующихся слоёв.

Возможности применения таких структур представляются весьма перспективными. Так, большой интерес представляют магнитоэлектрические свойства (эффект ГМС) [1,2]. В ряде работ рассматривается

также возможность применения трибологических и механических свойств таких поверхностей [3-6]. Многие металлические многослойные материалы были получены с использованием вакуумных технологий [7,8], но применение этих методов ограничено их высокой стоимостью, кроме того этими методами очень сложно синтезировать структуры из одномерных стержней.

Недавние исследования показали, что электроосаждение является весьма перспективным методом получения металлических мультислоев [9-11]. Несмотря на некоторые ограничения (например, необходимость применения водных растворов, невозможность для некоторых металлов осаждения из электролитов), электрохимический метод был успешно использован для получения таких многослойных систем, как Ni / Cu, NiCo / Cu [12] Co / Cu [13], NiFe / Cu [14].

Целью настоящей работы было получение массива гетероструктурных нанопроволок состава Cu/Ni и исследование их структуры с помощью растровой электронной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа. На предварительном этапе, для отработки метода, было проведено тестовое осаждение исследуемых металлов на плоскую поверхность.

Экспериментальные результаты

Осаждение металла на плоскую поверхность. Метод получения различных по составу гальванических осадков основан на разности равновесных потенциалов. В данной работе исследовалась возможность получения гетероструктурных нанопроволок Cu/Ni. Такие структуры удобно получать из одного раствора, включающего одновременно ионы двух металлов, так как равновесные потенциалы меди и никеля сильно различаются, а электролит не деградирует в ходе работы.

Состав электролита: NiSO₄*7H₂O - 196,7 г/л; CuSO₄*5H₂O - 6,25 г/л; H₃BO₃ - 31,6 г/л. Уменьшенная концентрация меди была взята на основании того, что Cu будет осаждаться при всех потенциалах, подаваемых на гальваническую ванну (т.к. Ni имеет более высокий равновесный потенциал осаждения). Следовательно, появление меди неизбежно во всех режимах, и для минимизации содержания Cu при осаждении Ni нужно уменьшит его общую концентрацию в ростовом растворе.

В данной работе для определения оптимальных потенциалов осаждения проводились исследования зависимости состава осаждаемого вещества от потенциала. Для этого проводилось осаждение на плоскую поверхность при разных потенциалах. На первом этапе также исследо-

валось влияние материала анода. В работе применялись растворимые аноды соответствующих металлов (медный и никелевый). Предполагалось, что они будут восстанавливать ионы осажденного металла.

В ходе электроосаждения были получены кривые зависимости силы тока от времени. По результатам подсчета средних значений силы тока, можно получить зависимость средней силы тока от подаваемого на гальваническую ячейку напряжения. До определенного потенциала увеличение силы тока от образца к образцу мало, это говорит о том, что скорость роста при таких потенциалах будет меньше а, как следствие, структура - более равномерной. При дальнейшем увеличении напряжения сила тока начинает резко возрастать, это говорит о том, что осаждение проходит значительно быстрее, а структура становится все менее идеальной.

После получения образцы исследовались на настольном растровом электронном микроскопе JCM-6000plus компании JEOL Ltd. Полученные изображения поверхности для некоторых образцов с использованием никелевого и медного анодов представлены на рисунке 1.

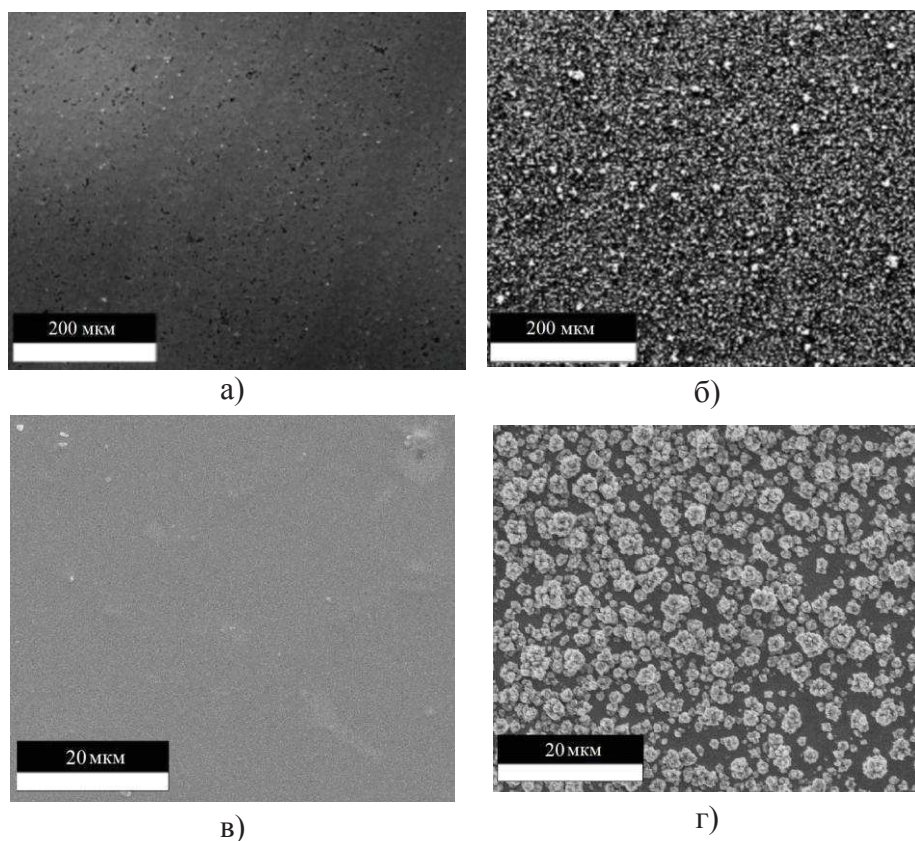


Рис. 1. Изображения поверхности образцов: а) 0,8 В с медным анодом, б) 1,8 В с медным анодом, в) 1,7 В с никелевым анодом, г) 3,2 В с никелевым анодом

Как видно из микротомографий поверхность с увеличением потенциала становится более рыхлой и неоднородной, как и предполагалось выше. Результаты элементного анализа поверхностей представлены на рисунке 2 для случая с никелевым анодом, на рисунке 3 – с медным анодом.

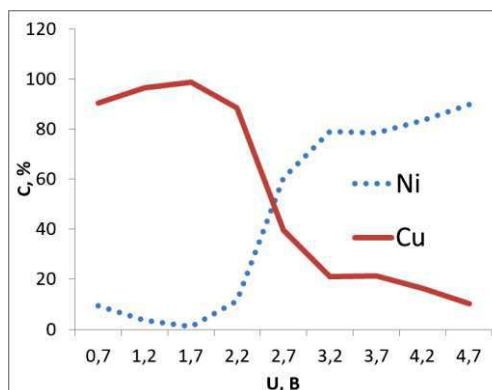


Рис. 2. Графики зависимости состава образца от напряжения для никелевого анода

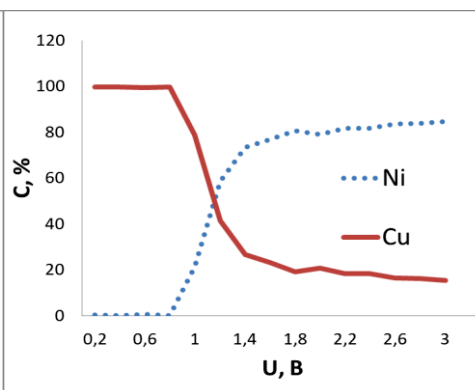


Рис. 3. Графики зависимости состава образца от напряжения для медного анода

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) Необходимо использовать медный анод так как: максимальная концентрация никеля в случае использования никелевого анода незначительно выше чем в случае медного анода, однако, потенциал при котором она достигается значительно выше. Концентрация меди равна 100% при потенциалах от 0,2 до 0,8 вольт в случае использования медного анода, в случае никелевого анода 100% концентрация не достигается.

2) Оптимальный потенциал для осаждения меди – 0,8 В, так как концентрация меди равна 100%, а поверхность остается однородной. Оптимальный потенциал для осаждения никеля – 1,8 В (При меньших потенциалах концентрация никеля значительно меньше, при больших - концентрация никеля с меняется незначительно, но поверхность ухудшается - становится более рыхлой и неоднородной).

Осаждение металлов в поры трековых мембран-получение и изучение нанопроволок. На основании вышеприведенных результатов был подобран режим электроосаждения гетероструктурных (слоевых) НП. На этом этапе осаждение велось уже в поры трековых матриц (ТМ) с диаметром пор 100 нм. Матрицы представляли из себя промышленные трековые мембраны, полученные путём облучения полимерной плёнки

(ПЭТФ) тяжёлыми высокоэнергетическими ионами на ускорителе (ОИЯИ, г.Дубна). На поверхность ТМ предварительно методом термического распыления в вакууме (ВУП-4) наносился слой меди толщиной 30 нм, который затем наращивался методом электролитического осаждения до толщины порядка 10 мкм. Это позволяло создать относительно прочный проводящий контактный слой для последующего роста НП. После подготовки матрицы проводилось осаждение в поры матрицы при поочередно меняющихся потенциалах 0,8 В и 1,8 В. Потенциал менялся от времени, для 0,8 В время осаждения составляло 12,5 с, для 1,8 – 1 с.

После электроосаждения матрица удалялась (химическое растворение в горячей щёлочи), а образцы массивов нанопроволок исследовались с помощью растрового электронного микроскопа. На рисунке 4 представлен общий вид массива нанопроволок получаемых данным методом.

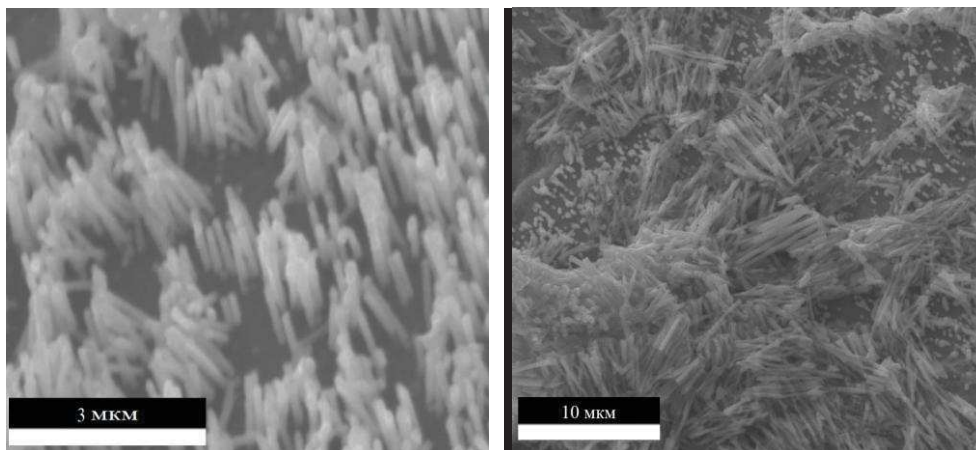


Рис. 4. Общий вид массивов нанопроволок

На представленных микрофотографиях можно различить небольшие изменения в контрасте и толщине по длине нанопроволок однако это не является точным подтверждением наличия отдельных слоев. Для более подробного исследования распределения элементов по длине нанопроволок проводилось исследование с помощью просвечивающей электронной микроскопии (рисунок 5).

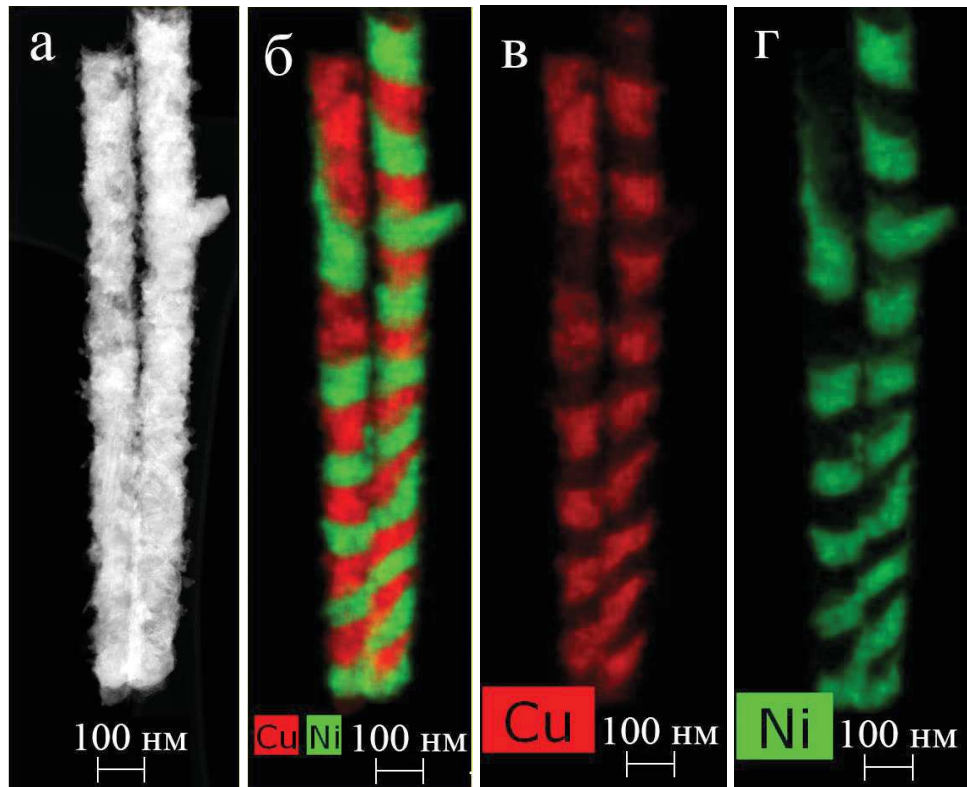


Рис. 5. Расположение слоёв в НП (10 слоёв): а) ПРЭМ-изображение с z-контрастом, б-г) карты распределения химических элементов

Из полученных данных можно сделать следующие выводы:

- 1) Метод темплатного осаждения позволяет получать гетероструктурные нанопроволоки с четко разделяемыми слоями;
- 2) Медь присутствует по всей длине нанопроволок, однако, в зависимости от потенциала, её концентрация резко меняется от 15% -20% до 100%;
- 3) Никель осаждается только в слоях, получаемых при большем потенциале;
- 4) Слои имеют изменяющуюся по длине нанопроволоки толщину. Предположительно это связано с диффузионными особенностями ионов в поры матрицы.

На следующем этапе проводился рентгеноструктурный анализ. Проводилось сравнение рентгенограмм массивов нанопроволок и слоев осажденных на плоскую поверхность в том же режиме. Отметим, что при данном исследовании матрица не удалялась. Полученные результаты представлены на рисунке 6.

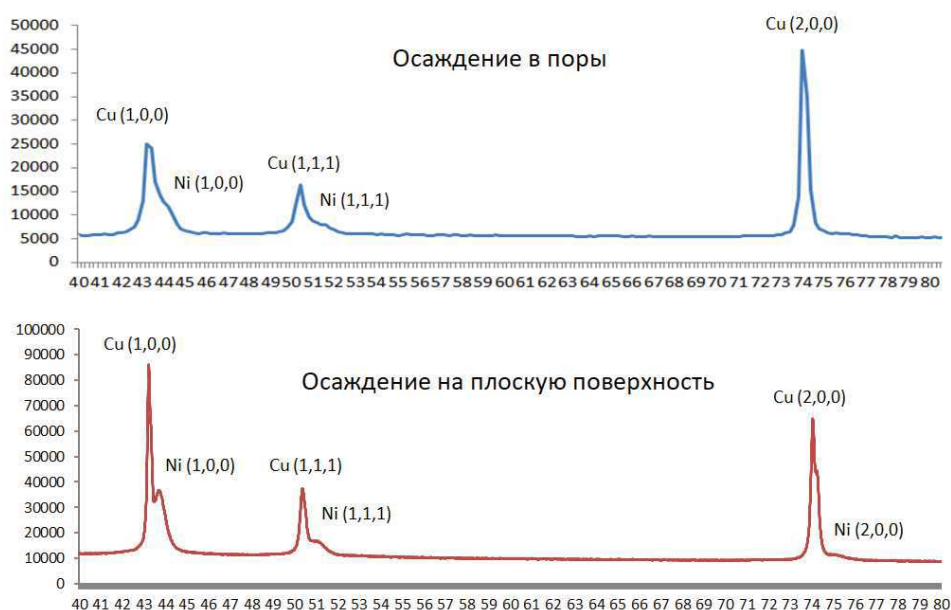


Рис. 6. Ренгенограммы образцов нанопроволок и плоских слоев

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- 1) Одни и те же пики присутствуют как в образцах нанопроволок, так и в плоских слоях;
- 2) Пики твердого раствора никеля с примесью меди значительно шире пиков чистой меди, это говорит о меньшем размере кристаллитов твердого раствора. Это объясняется большей скоростью роста слоя «никеля» и подтверждает предположения выдвинутые на стадии осаждения на плоскую поверхность при разных потенциалах;
- 3) В образцах нанопроволок пики уширяются, что говорит о уменьшении линейного размера кристаллитов при осаждении в поры матрицы.

Заключение

На первом этапе работы была изучена зависимость состава осаждающегося из электролита материала в зависимости от подаваемого напряжения и материала анода. На основе полученных данных был выбран режим получения массива гетероструктурных НП на основе пористой матрицы-трековой мембраны. Полученные структуры-нанопроволоки состоят из чередующихся слоев, что подтверждено результатами просвечивающей электронной микроскопии. Рентгеноструктурный анализ показал значительное уширение пиков, связанное с малым размером кристаллитов. Кристаллиты в никелевых слоях значительно

меньше медных кристаллитов, что связано с различием в ростовом напряжении.

Работы проводилось в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН - при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗЗ63/26), синтез нанопроволок проводился при частичной поддержке гранта РФФИ 18-32-01066. Авторы благодарны проф. П.Ю. Апелю (ОИЯИ, г. Дубна) за предоставление образцов мембран.

Литература

1. M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich and J. Chazelas // *Phys. Rev. Lett.* 61 (1988) 2472.
2. K. Ludwig, J. Hauch, R. Mattheis, K.U. Barholz and G. Rieger // *Sens. Actuators A* 106 (2003) 15.
3. X. Zhang, A. Misra, H. Wang, T.D. Shen, M. Nastasi, T. E. Mitchell, J.P. Hirth, R.G. Hoagland and J.D. Embury // *Acta Mater.* 52 (2004) 995.
4. P.M. Anderson, J.F. Bingert, A. Misra and J.P. Hirth // *Acta Mater.* 51 (2003) 6059.
5. Z.J. Liu, A. Vyas, Y.H. Lu and Y.G. Shen // *Thin Solid Films* 479 (2005) 31.
6. A.S.M.A. Haseeb, J.P. Celis and J.R. Roos // *Thin Solid Films* 444 (2003) 199.
7. M. Onishi, R. Ishihara, A. Kida, M. Doi, H. Asano and M. Matsui // *J. Magn. Magn. Mater.* 272–276 (2004) E1413.
8. D.A.R. Barkhouse, A. Bonakdarpour, M. Fleischauer, T.D. Hatchard and J.R. Dahn // *J. Magn. Magn. Mater.* 261 (2003) 399.
9. W. Schwarzacher, O.I. Kasyutich, P.R. Evans, M.G. Darbyshire, Ge Yi, V.M. Fedosyuk, F. Rousseaux, E. Cambriil and D. Decanini // *J. Magn. Magn. Mater.* 198-199 (1999) 185.
10. J.M.D. Coey and G. Hinds // *J. Alloys Compd.* 326 (2001) 238.
11. D. Landolt and A. Marlot // *Surface and Coatings Technology* 169 (2003) 8.
12. E. Gomez, S. Pane and E. Valles // *Electrochim. Acta* 51 (2005) 146.
13. T. Cziraki, M. Koteles, L. Peter, Z. Kupay, J. Padar, L. Pogany, I. Bakonyi, M. Uhlemann, M. Herrich, B. Arnold, J. Thomas, H.D. Bauer and K. Wetzig // *Thin Solid Films* 433 (2003) 237.
14. E. Chassaing // *J. Electrochem. Soc.* 144 (1997) L328.

**Труды XXVIII Международной конференции
«Радиационная физика твёрдого тела»
(Севастополь, 9 – 14 июля 2018 г.)**

Научный редактор:
д.ф.-м.н. Бондаренко Геннадий Германович

Подписано в печать 22. 06. 2018г.
Бумага типографская. Печать - ризография.
Формат 70x108/16.
Тираж 100 экз. Заказ 385.

Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ»
115054, Москва, ул. М.Пионерская, д. 12
Тел/факс (499) 959-37-03, 959-37-05 e-mail: info@niipmt.ru

Отпечатано в ООО «Телер»
125130, Москва, ул. Клары Цеткин, д. 28
Тел/факс (495) 937-86-64, e-mail: piskarev@teler.ru

ISBN 978-5-89671-023-3



9 785896 710233