



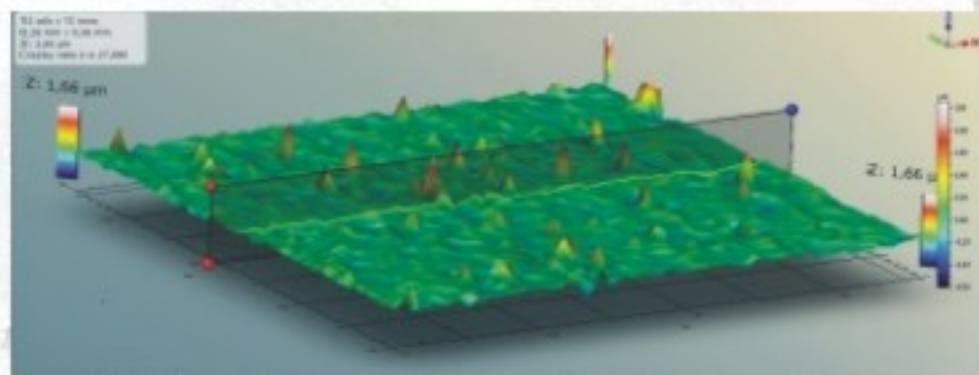
Журнал фізики та інженерії поверхні

Журнал фізики
и инженерии
поверхности

Том 1, № 1

Vol. 1, No. 1

Journal of
Surface Physics
and Engineering



2016

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені В. Н. КАРАЗІНА
НАУКОВИЙ ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР МОН та НАН УКРАЇНИ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Журнал фізики та інженерії поверхні

Журнал фізики и инженерии поверхности

ЗАСНОВАНИЙ У 2016 РОЦІ

ВИДАЄТЬСЯ 4 РАЗИ НА РІК

Journal of Surface Physics and Engineering

Том 1, № 1, січень – березень 2016

ХАРКІВ

Редакційна колегія

Азаренков М. О. (головний редактор), Фаренік В. І. (перший заступник головного редактора), Береснев В. М. (заступник головного редактора), Турбін П. В. (заступник головного редактора), Удовицький В. Г. (відповідальний секретар), Агеєв Л. О., Андреев А. О., Бакай О. С., Бізюков О. А., Брагіна Л. Л., Воеводін В. М., Войцєня В. С., Гірка І. О., Гордієнко Ю. Є., Дзюбенко М. І., Довбня А. М., Дудін С. В., Єгорєнков В. Д., Єрмолаєв О. М., Клепиков В. Ф., Ковтун Г. П., Кондратенко А. М., Костюк Г. І., Лавриненко С. Д., Литвиненко В. В., Литовченко С. В., Милославський В. К., Неклюдов І. М., Погребняк О. Д., Соболев О. В., Хороших В. М., Целуйко О. Ф.

Адреса редакції: НФТЦ МОН та НАН України, майдан Свободи, 6, м. Харків, 61022, а/с 4499, Україна

Тел. 38 057 7054667, e-mail: journal_pse@ukr.net, <http://www.pse.scpt.org.ua>

Редакционная коллегия

Азаренков Н. А. (главный редактор), Фареник В. И. (первый заместитель главного редактора), Береснев В. М. (заместитель главного редактора), Турбин П. В. (заместитель главного редактора), Удовицкий В. Г. (ответственный секретарь), Агеєв Л. А., Андреев А. А., Бакай А. С., Бизюков А. А., Брагина Л. Л., Воеводин В. Н., Войцєня В. С., Гирка И. А., Гордиенко Ю. Е., Дзюбенко М. И., Довбня А. Н., Дудин С. В., Егорєнков В. Д., Ермолаєв А. М., Клепиков В. Ф., Ковтун Г. П., Кондратенко А. Н., Костюк Г. И., Лавриненко С. Д., Литвиненко В. В., Литовченко С. В., Милославский В. К., Неклюдов И. М., Погребняк А. Д., Соболев О. В., Хороших В. М., Целуйко А. Ф.

Адрес редакции: НФТЦ МОН и НАН Украины, площадь Свободы, 6, г. Харьков, 61022, п/я 4499, Украина

Тел. 38 057 7054667, e-mail: journal_pse@ukr.net, <http://www.pse.scpt.org.ua>

Editorial Board

Azarenkov M. O. (Editor-in-Chief), Farenik V. I. (Vice Editor-in-Chief), Beresnev V. M. (Associate Editor-in-Chief), Turbin P. V. (Associate Editor-in-Chief), Udovytskiy V. G. (Executive secretary), Ageiev L. O., Andreiev A. O., Bakai O. S., Biziukov O. A., Bragina L. L., Voievodin V. M., Voitsenia V. S., Girka I. O., Gordiienko Yu. Ye., Dziubenko M. I., Dovbnia A. M., Dudin S. V., Yegorenkov V. D., Yermolaiev O. M., Khoroshikh V. M., Klepikov V. F., Kovtun G. P., Kondratenko A. M., Kostyuk G. I., Lavrinenko S. D., Lytvynenko V. V., Lytovchenko S. V., Miloslavsky V. K., Nekliudov I. M., Pogrebnyak O. D., Sobol O. V., Tseluiko O. F.

Address: SCPT MES & NAS Ukraine, 6 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, box 4499, Ukraine
Tel. 38 057 7054667, e-mail: journal_pse@ukr.net, <http://www.pse.scpt.org.ua>

Затверджено до друку рішенням

Вченої ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, (протокол № 4 від 28 березня 2016 р.)

Вченої ради Наукового фізико-технологічного центру, (протокол № 3 від 16 березня 2016 р.)

Статті пройшли внутрішнє та зовнішнє рецензування.

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 9214 від 29. 09. 04.

<i>Сейдаметов С. В., Лоскутов С. В.</i> Влияние импульсной электромагнитной обработки на структурные перестройки сплава титана VT3-1.....	4
<i>Ковалюк З. Д., Юрценюк С. П., Семенчук І. І.</i> Отримання активованого нанопористого вуглецевого матеріалу з органічної сировини рослинного походження для суперконденсаторів.....	9
<i>Болезюк В. Б., Ковалюк З. Д., Пирля М. М., Поцілуйко Р. Л.</i> Вплив лазерного опромінення на процес впровадження водню в шаруваті кристали GaSe.....	13
<i>Лисенков Е. А., Клепко В. В.</i> Теоретичний аналіз електропровідності полімерних наноккомпозитів на основі олігогліколів та вуглецевих нанотрубок.....	17
<i>Першин Ю. П., Девизенко А. Ю., Мамон В. В., Чумак В. С., Кондратенко В. В.</i> Структура, фазовый состав и модель роста аморфных многослойных рентгеновских зеркал W-Si, изготовленных методом магнетронного распыления.....	27
<i>Салій Я. П., Біліна І. С., Соколов О. Л.</i> Поверхневі наноструктури конденсату CdTe на склі та ситалі.....	42
<i>Алимов Н. Э., Зайнолобиддинова С. М., Отажонов С. М., Халилов М. М., Юсупова Д. А., Якубова Ш.</i> Изменение потенциальных барьеров низкоразмерных тонких пленок р-CdTe в условиях внешних воздействий.....	52
<i>Погребняк А. Д., Аид Куссей Джаруллах</i> Структурно-фазовое состояние поверхности при высокодозной ионной имплантации титана в монокристаллы Си.....	57
<i>Васильев В. В., Лучанинов А. А., Решетняк Е. Н., Стрельницкий В. Е., Толмачева Г. Н., Прибытков Г. А., Коржова В. В.</i> Структура и свойства нитридных покрытий, осажденных из фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы с использованием порошкового катода Cr _{0,5} Al _{0,5}	62
<i>Фареник В. И.</i> Rotating plasma.....	81
<i>Правила оформлення статей.....</i>	120
<i>Правила оформления статей.....</i>	121
<i>Information for authors.....</i>	122

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНЫЕ ПЕРЕСТРОЙКИ СПЛАВА ТИТАНА VT3-1

С. В. Сейдаметов, С. В. Лоскутов

*Запорожский национальный технический университет,
Запорожье, Украина*

Поступила в редакцию 06.11.2015

Исследовано влияние импульсов магнитного и электрического полей на эволюцию дефектной структуры сплава титана VT3-1. Показано, что электромагнитная обработка приводит к релаксационным процессам дислокационной структуры, в результате чего изменяется напряженно-деформированное состояние кристаллической решетки титанового сплава.

Ключевые слова: сплавы титана, нитридные покрытия, электромагнитное поле, дефектная структура, остаточные макронапряжения, микродеформации.

ВПЛИВ ІМПУЛЬСНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРНІ ПЕРЕБУДОВИ СПЛАВУ ТИТАНА VT3-1

С. В. Сейдаметов, С. В. Лоскутов

Досліджено вплив імпульсів магнітного та електричного полів на еволюцію дефектної структури сплаву титана VT3-1. Показано, що електромагнітна обробка призводить до релаксаційних процесів дислокаційної структури в результаті чого змінюється напружено-деформований стан кристалічної решітки титанового сплаву.

Ключові слова: сплави титану, нітридні покриття, електромагнітне поле, дефектна структура, залишкові макронапруження, мікродеформації.

THE INFLUENCE OF PULSE ELECTROMAGNETIC FIELD ON REBUILDING OF STRUCTURE OF TITANIUM ALLOY VT3-1

S. V. Seidametov, S. V. Loskutov

The effect of pulse magnetic and electric fields on the evolution of the defective structure of titanium alloy VT3-1 was investigated. It was shown that electromagnetic treatment leads to relaxation processes of the dislocation structure resulting in a change of the stress-strain state of the crystal lattice of the titanium alloy.

Keywords: titanium alloy, nitride coatings, electromagnetic field, defect structure, residual macrostresses, microstrains.

ВВЕДЕНИЕ

В результате механических, тепловых и различного рода электромагнитных воздействий в поверхностном слое металлов происходят изменения в структуре, формируется определённое напряженно-деформированное состояние материала приповерхностного слоя. С целью исследования влияния электрических и магнитных полей на физико-механические характеристики металлов, была поставлена задача изучения закономерностей формирования остаточных напряжений вблизи поверхности при импульсной электромагнитной обработке.

В качестве материала для исследований был выбран конструкционный титановый сплав марки VT3-1, который нашел широкое применение в авиационной промышленности для изготовления лопаток компрессора газотурбинных двигателей [1, 2]. Такого рода исследования представляют практический и научный интерес, поскольку, во-первых, природа многих аспектов взаимодействия ионной и электронной подсистем ферромагнитных металлов под воздействием электрических и магнитных полей на сегодняшний день еще недостаточно ясна [3–6]. Во-вторых, изучение закономерностей модификации дефектной структуры

неферромагнитных металлов при помощи электрических и магнитных полей позволит расширить теорию оптимальных кристаллических структур с прогнозируемыми физическими и механическими свойствами.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментальных исследований были подготовлены 3 группы титановых образцов различной формы: 1) плоские пластинки с размерами $1 \times 15 \times 25 \text{ mm}^3$; 2) образцы в форме лопатки компрессора газотурбинного двигателя с размерами пера $15 \times 25 \text{ mm}^2$; 3) образцы в форме параллелепипеда с размерами $4,4 \times 70 \times 10 \text{ mm}^3$ с покрытием нитрида титана толщиной 2–3 μm . Нитридные покрытия наносились методом конденсации из плазменной фазы в условиях ионной бомбардировки поверхности на установке типа «Булат».

В работе [7] установлено, что для обнаружения влияния магнитного поля на пластичность кристаллов (магнитоэластический эффект) при комнатных температурах и значениях индукции магнитного поля B_0 , для которых выполняется неравенство $U_M/kT \ll 1$ (где $U_M \approx g\mu_B B_0$ — энергия, передаваемая парамагнитной частице в постоянном магнитном поле с индукцией B_0), необходимо создание неравновесных дефектов внешними воздействиями такими как: воздействие светом, экспозиция в переменном электрическом поле, пластическая деформация, нагрев и охлаждение. Для создания неравновесной дислокационной структуры образцы 1 и 2 группы подвергались поверхностной упрочняющей обработке стальными шариками диаметром 1 mm в течении 70 s в ультразвуковом поле, в результате которой в поверхностном слое были наведены остаточные сжимающие макронапряжения $\sigma = -(300-350) \text{ МПа}$. Для получения импульсного магнитного поля был выбран метод прямого разряда батареи конденсаторов типа ИМ 5-140 ($C = 400 \mu\text{F}$, $U_{\text{max}} = 10 \text{ kV}$) через медный соленоид диаметром 43 mm, длиной 45 mm, в который помещался исследуемый образец. Для регулировки тока через соленоид и исключения перезарядки батареи конденсаторов в электрическую цепь экспериментальной

установки последовательно был включен медный проводник диаметром 0,5 mm и длиной 20 mm, который взрывался при разрядке батареи конденсаторов.

Обработка титановых образцов 1 и 2 группы магнитным импульсом проводилась многократно в режиме зарядки конденсаторной батареи до 5 kV. В таблице 1 приведены параметры осциллограмм импульсного разряда через медный соленоид. Амплитудное значение индукции магнитного поля в импульсе составляло $B = 0,37 \text{ Т}$.

На образцах 1 и 2 группы рентгенодифрактометрическим (РД) методом были измерены остаточные напряжения I и II рода. Использовалось монохроматическое излучение линии CoK_β . Площадь исследуемого участка поверхности образцов составляла $1 \times 3 \text{ mm}^2$. Осуществлялось однократное сканирование с шагом $0,1^\circ$ и постоянной времени 5 s. Данные, полученные на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М, подвергались обработке в программе «Origin». Для определения остаточных напряжений I рода была выбрана и анализировалась линия (213) $\alpha\text{-Ti}$. Проводились следующие операции: сглаживание кривых; вычитание фона; аппроксимация по Гауссу; расчет центра тяжести дифракционных пиков. При расчете напряжений по пяти точкам, использовали модуль Юнга $E = 117 \text{ GPa}$ и коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Погрешность измерения макронапряжений $\delta\sigma$ оценивали по формуле [8]:

$$\delta\sigma = \frac{E}{\mu} \text{ctg}\theta \delta\Delta\theta, \quad (1)$$

где θ — угол дифракции рентгеновских лучей; $\delta\Delta\theta = 0,05^\circ$ — точность измерения смещения угла θ .

Как известно, существенный вклад в изменение характеристик механической прочности металлов и сплавов вносят их субструктурные параметры: размер областей когерентного рассеяния и величина микродеформаций [8]. Изменение этих характеристик в процессе деформации дает информацию, необходимую для понимания процессов формирования той или иной структуры материала, явлений, происходящих при деформации сплава. Для определения размеров областей

Таблица 1

Параметры осциллограмм импульсного разряда через медный соленоид

Рабочее напряжение U , kV	Амплитуда тока I , A	Период t , μ s	Декремент затухания	Индукция магнитного поля B , Т
5	4740	286	2,09	0,37

когерентного рассеяния D и величины микроскопических деформаций ε применяли метод гармонического анализа формы рентгеновских линий. Рабочими отражениями служили линии Ti_{α} (102) и (213). По полученным экспериментальным данным рассчитывались коэффициенты Фурье для исследуемых образцов и для эталона (титановый образец после вакуумного отжига).

Обработка образцов 3 группы импульсом электрического тока проводилась многократно путем разрядки батареи конденсаторов через образец. Амплитудное значение плотности тока составляло порядка 100 MA/m^2 , длительность импульса $150 \mu\text{s}$. РД измерения остаточных напряжений на образцах осуществлялись в двух взаимноперпендикулярных направлениях (вдоль и поперёк образца) в покрытии TiN и в материале подложки (сплав титана ВТЗ-1). Анализировались линии (422) TiN и (204) сплава титана ВТЗ-1. Стравливание пленки TiN на $1/2$ площади поверхности исследуемых образцов осуществлялось химическим способом в смеси концентрированных азотной и соляной кислот.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов измерений остаточных макронапряжений в титановых образцах 1 и 2 группы до и после обработки магнитным импульсом (рис. 1) показал, что многократное действие импульсов магнитного поля приводит к релаксации механических напряжений в их поверхностном слое. Суммарная интегральная ошибка измерений остаточных макронапряжений, учитывающая геометрические и физические факторы, не превышала 20 MPa .

Анализ экспериментальных данных также показал (рис. 2), что такая многократная обработка титановых образцов

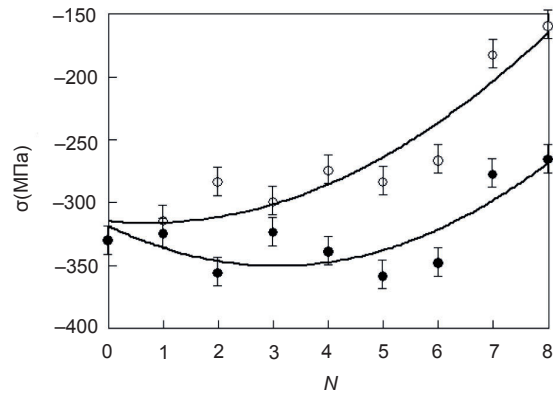


Рис. 1. Зависимость остаточных сжимающих макронапряжений (σ) от числа циклов (N) обработки образцов магнитным импульсом с индукцией $B = 0,37 \text{ Т}$. ○, ● — измерения в поперечном и продольном направлениях

приводит к монотонному увеличению областей когерентного рассеяния и к одновременному снижению остаточных микроскопических деформаций. Как видно из графиков, полученные результаты для параметров тонкой структуры удовлетворительно согласуются с данными для

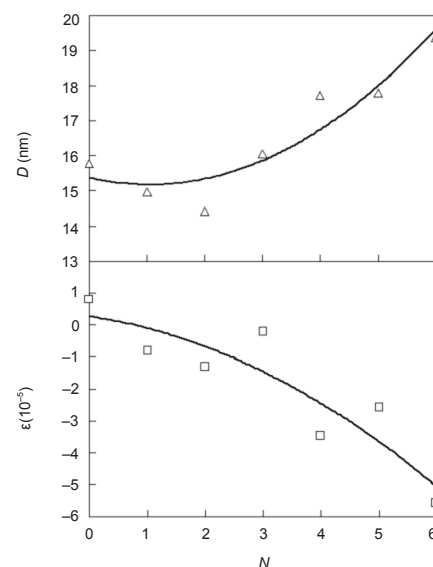


Рис. 2. Зависимость размеров областей когерентного рассеяния (D) и микродеформаций (ε) от числа циклов (N) обработки титановых образцов магнитным импульсом с индукцией $B = 0,37 \text{ Т}$

макронапряжений: снижение микродеформаций приводит к соответствующему уменьшению механических макронапряжений.

Как известно, из данных о размерах областей когерентного рассеяния D можно оценить значения плотности дислокаций ρ , пользуясь соотношением [8]:

$$\rho = \frac{3}{D^2}. \quad (2)$$

Таким образом, как видно из графиков на рис. 2, каждая последующая обработка образцов магнитным импульсом приводит монотонному снижению плотности дислокаций.

Анализ результатов измерений остаточных макронапряжений в титановых образцах с нитридным покрытием до и после многократной обработки импульсом электрического тока (рис. 3) позволил установить следующие экспериментальные закономерности. В приповерхностном слое титановых образцов с нитридным покрытием наблюдаются наибольшие остаточные сжимающие макронапряжения $\sigma = -(2000-3000)$ МПа. Многократная обработка образцов электрическим импульсом изменяет глубину залегания остаточных макронапряжений как в материале покрытия, так и в материале подложки. Остаточные макронапряжения в покрытии TiN после второй обработки изменяются наиболее существенно и переходят в растягивающие, а после третьей обработки они релаксируют до уровня значений исходного состояния. Наибольшее

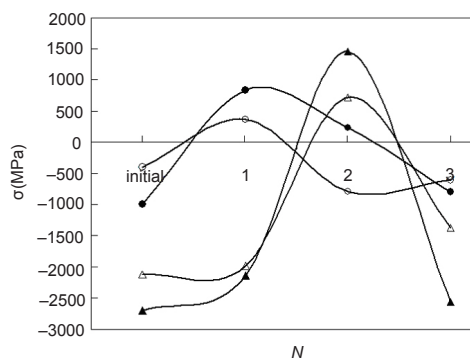


Рис. 3. Зависимость остаточных макронапряжений (σ) в покрытии TiN и в материале подложки (сплав титана ВТЗ-1) от числа циклов (N) обработки образцов импульсом электрического тока $j_m = 100$ МА/м². ●, ○ — линия ВТЗ-1 (204); ▲, △ — линия TiN (422). Заштрихованные маркеры — измерения в продольном направлении образцов, незаштрихованные — в поперечном

изменение остаточных напряжений в материале подложки наблюдалось после первой обработки.

ВЫВОДЫ

Показано, что многократная обработка образцов из титанового сплава ВТЗ-1 магнитным импульсом с индукцией $B = 0,37$ Т приводит к стабилизации неравновесной дефектной структуры: на 20–50 % уменьшаются наведенные механической обработкой остаточные макроскопические напряжения; происходит укрупнение блоков мозаики, уменьшаются остаточные микроскопические деформации, снижается плотность дислокаций. Многократная обработка образцов из сплава титана ВТЗ-1 с защитным покрытием на основе нитрида титана импульсом электрического тока $j_m = 100$ МА/м² приводит к релаксационным процессам дислокационной структуры в результате чего изменяется плоско-напряженное состояние как материала подложки, так и материала покрытия. При этом наибольшие изменения наблюдаются в материале нитридного покрытия.

Возможным механизмом понижения напряженно-деформированного состояния кристаллической решетки сплава титана при обработке магнитным импульсом и нитридного покрытия при обработке электрическим импульсом может быть выход дислокаций на поверхность, а также смещение дислокаций за счет снижения потенциальной энергии стопоров, тормозящих их движение [3, 5, 9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Плющев В. Е. Справочник по редким металлам. — М.: Мир, 1965. — 784 с.
2. Арзамасов Б. Н. Конструкционные материалы / Справочник. — М.: МГТУ им. Н. Э Баумана, 2005. — 293 с.
3. Головин Ю. И. Магнитопластичность твердых тел (Обзор) // Физика твердого тела. — 2004. — Т. 46, вып. 5. — С. 769–803.
4. Васильев М. А. Особенности пластической деформации металлов и сплавов в магнитном поле. Обзор // Успехи физики металлов. — 2007. — Т. 8, вып. 1. — С. 65–105.
5. Батаронов И. Л. Механизмы электропластичности // Соросовский образовательный журнал. — 1999. — № 10. — С. 93–99.

6. Рощупкин А. М., Батаронов И. Л. Критический анализ теорий электроннопластического эффекта // Известия вузов. Черная металлургия. — 1990. — № 10. — С. 75–76.
 7. Моргунов Р. Б. Спин-зависимые реакции между дефектами структуры и их влияние на пластичность кристаллов в магнитном поле // Вестник РФФИ. — 2003. — № 2. — С. 19–46.
 8. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. — М.: Металлургия, 1970. — 126 с.
 9. Алехин В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. — М.: Наука, 1983. — 76 с.
 4. Vasil'ev M. A. Osobennosti plasticheskoy deformacii metallov i splavov v magnitnom pole. Obzor // Uspehi fiziki metallov. — 2007. — Vol. 8, vyp. 1. — P. 65–105.
 5. Bataronov I. L. Mehanizmy elektroplastichnosti // Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal. — 1999. — No. 10. — P. 93–99.
 6. Roschupkin A. M., Bataronov I. L. Kriticheskij analiz teorij elektronoplasticheskogo effekta // Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya. — 1990. — No. 10. — P. 75–76.
 7. Morgunov R. B. Spin-zavisimye reakcii mezhdru defektami struktury i ih vliyanie na plastichnost' kristallov v magnitnom pole // Vestnik RFFI. — 2003. — No. 2. — P. 19–46.
 8. Gorelik S. S., Rastorguev L. N., Skakov Yu. A. Rentgenograficheskij i elektronnoopticheskij analiz. — М.: Metallurgiya, 1970. — 126 p.
 9. Alehin V. P. Fizika prochnosti i plastichnosti poverhnostnyh sloev materialov. — М.: Nauka, 1983. — 76 p.
- LITERATURA**
1. Plyushev V. E. Spravochnik po redkim metallam. — М.: Mir, 1965. — 784 p.
 2. Arzamasov B. N. Konstrukcionnye materialy / Spravochnik . — М.: MGTU im. N. E. Baumana, 2005. — 293 p.
 3. Golovin Yu. I. Magnitoplastichnost' tverdyh tel (Obzor) // Fizika tverdogo tela. — 2004. — Vol. 46, vyp. 5. — P. 769–803.

ОТРИМАННЯ АКТИВОВАНОГО НАНОПОРИСТОГО ВУГЛЕЦЕВОГО МАТЕРІАЛУ З ОРГАНІЧНОЇ СИРОВИНИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ ДЛЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ

З. Д. Ковалюк, С. П. Юрценюк, І. І. Семенчук

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
Чернівецьке відділення, Чернівці,
Надійшла до редакції 10.11.2015*

Проведено дослідження енергоємнісних характеристик пористого вуглецевого матеріалу отриманого методом піролізу з органічної сировини рослинного походження (шкірки апельсина) та потім активованого в лужному середовищі. Показано, що кількаразове повторення процесу активації приводить до зростання величини ємності. Дано обґрунтування цього явища.
Ключові слова: органічна сировина, суперконденсатори, вуглецевий матеріал, активація вуглецю.

ПОЛУЧЕНИЕ АКТИВИРОВАННОГО НАНОПОРИСТОГО УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ОРГАНИЧЕСКОГО СЫРЬЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ДЛЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ

З. Д. Ковалюк, С. П. Юрценюк, И. И. Семенчук

Проведено исследование энергоёмкостных характеристик пористого углеродного материала полученного методом пиролиза из органического сырья растительного происхождения (кожуры апельсина) и затем активированного в щелочной среде. Показано, что неоднократное повторение активации приводит к росту величины ёмкости. Дано обоснование этого явления.
Ключевые слова: органическое сырьё, суперконденсаторы, углеродный материал, активация углерода.

PREPARATION OF ACTIVATED NANOPOROUS CARBON MATERIAL FOR SUPERCAPACITORS FROM VEGETABLE RAW MATERIALS

Z. D. Kovalyuk, S. P. Yurtsenyuk, I. I. Semenchuk

Investigations of capacitive characteristics are carried out for a porous carbon material obtained by a pyrolysis technique from orange rind, an organic raw material of vegetable nature, and then activated in an alkaline medium. It is shown that a recurrence of the activation process leads to an increase of the capacity value of the material. An explanation for this phenomenon is proposed.
Keywords: organic raw material, supercapacitor, carbon material, activation of carbon.

ВСТУП

Споживання енергії на видобувному паливі, за прогнозами, викличе серйозні проблеми у світовій економіці та екології в основному через виснаження ресурсів і збільшення екологічних проблем. Тому, велику увагу привертає розробка альтернативних джерел накопичення та переробки енергії, які зможуть замінити існуючі не екологічні джерела.

Суперконденсатори (СК) або ультраконденсатори є одним з найбільш перспективних електрохімічних систем зберігання енергії, які привернули велику увагу через

їх потенційне застосування, починаючи від мобільних пристроїв до електричних транспортних засобів. [1]

СК діляться на дві категорії, а саме, електричні конденсатори на подвійному електричному шарі (ПЕШ) та псевдоконденсаторами, що відрізняються за механізмом накопичення заряду. В конденсаторах з ПЕШ накопичення заряду відбувається на межі розділу електрода і електроліту без фарадеевських реакцій, а у псевдоконденсаторах проявляється при накопиченні заряду фарадеевські окислювально-відновлювальні реакції.

В останні роки найбільше значення в розробках СК набули суперконденсатори з ПЕШ за рахунок великої щільності потужності, що забезпечує короточасні цикли заряду і розряду. В якості електродних матеріалів в таких СК успішно використовуються нанопористі вуглецеві матеріали з органічної сировини рослинного походження, що значно зменшує вартість виготовлення СК, крім того, такі матеріали є широкодоступні та екологічні і можуть вирішити проблеми утилізації такої сировини. [2]

Нанопористі вуглецеві матеріали з органічної сировини рослинного походження отримуються методами карбонізації та активації при високих температурах, та володіють великою розвиненою площею внутрішньої поверхні, високою ємністю та низьким внутрішнім опором.

У цій статті ми отримуємо активований вуглець з шкірок апельсина в якості електродної компоненти в суперконденсаторах.

ЕКСПЕРИМЕНТ І РЕЗУЛЬТАТ

Для отримання активovanого нанопористого вуглецю в якості електродних матеріалів для суперконденсаторів ми брали вихідну сировину шкірки апельсина.

Вихідний матеріал перед початком процесу карбонізації промивався в дистильованій воді та просушувався в сушильній камері при температурі 90 °С протягом 40 хв. Після чого просушений матеріал поміщався в реторту, яка підключалась до відкачуваної системи і відкачувалась до залишкового тиску 10^{-1} мм. рт. ст. Потім відкачану реторту поміщали в попередньо нагріту до температури 650 °С трубчасту піч не від'єднуючи відкачуваної системи та витримували там протягом 60 хв. Після чого реторту виймали з печі продовжуючи відкачку ще 10–15 хв і герметизуючи її залишали охолоджуватись до температури навколишнього середовища. [3]

Після охолодження карбонізований матеріал виймався з реторти та промивався в дистильованій воді. Питома ємність карбонізованого матеріалу складала 40 Ф/г, що свідчить про наявність пор, які беруть участь в накопиченні заряду та гідрофобність матеріалу. Для покращення ємнісних характеристик матеріалу потрібно провести процес активації. Для цього карбонізований матеріал перемішувався з активатором, в нашому випадку це 30 % водний розчин КОН, з розрахунком маси матеріалу до маси активатора 1 : 2. [4]

Просочений матеріал поміщався в реторту, після чого реторта відкачувалась вакуумною системою до залишкового тиску $1-2 \cdot 10^{-1}$ мм. рт. ст. та поміщалась в попередньо нагріту до температури 850–900 °С трубчасту піч і витримувалась там на протязі 40 хв. Після чого виймалась та охолоджувалась до температури навколишнього середовища. [5]

Процес активації проводився в три етапи, після кожного етапу активації в матеріал додавалась нова порція 30 % водного розчину КОН та активувалась при однакових умовах. [6] Після кожного етапу проводились виміри питомої ємності отриманого матеріалу (табл. 1).

Питома ємність матеріалу визначалась за формулою:

$$C = \frac{I \cdot t}{U}$$

$$C_{num} = \frac{2C}{m}$$

де, m — маса електроду.

Для дослідження енергоємнісних характеристик матеріалу були зібрані зразки з 30 % водним розчином електроліту з наважкою маси електродів 20 мг. [7]

Таблиця 1

Питома ємність отриманого матеріалу після процесів карбонізації та активації

Карбонізований матеріал	40 Ф/г
Одноразова активація	109 Ф/г
Двохразова активація	143 Ф/г
Трьохразова активація	160 Ф/г

Циклювання зразків проводились на установці «Series 2000 Battery Test System» фірми Massog в режимі постійного струму. Заряд-розрядні криві представлені на рис. 1.

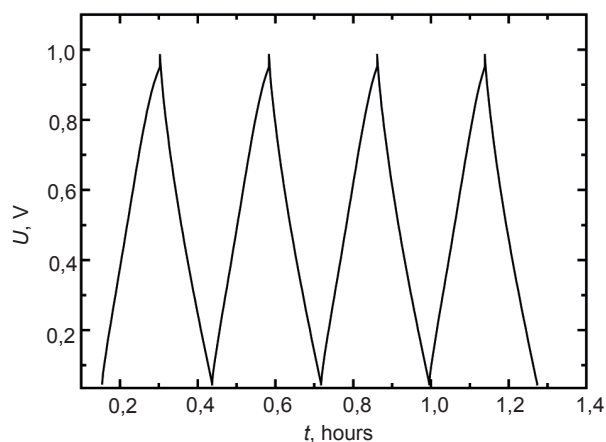


Рис. 1. Заряд-розрядні криві макетного суперконденсатора з $I_{\text{зар}} = I_{\text{роз}} = 2$ мА

Кулонівська ефективність: $\approx 0,98$

На рис. 2 показані залежності питомої ємності від зміни струмів $I_{\text{зар}}$ та $I_{\text{роз}}$.

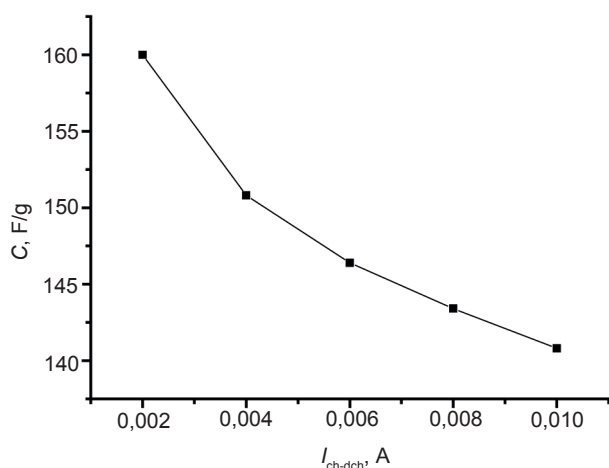


Рис. 2. Залежності питомої ємності при різних струмах $I_{\text{зар}}$ та $I_{\text{роз}}$

Видно, що максимальні значення питомої ємності досягаються при $I_{\text{зар}} = I_{\text{роз}} = 2$ мА. Зі збільшенням струмів заряду та розряду питома ємність падає. [8]

Були проведені дослідження часу розряду СК від опору навантаження (рис. 3) при 10, 20, 50, 100 Ом. Розряд здійснювався від вихідної напруги 1 В до 0,3 В зарядженого СК постійним струмом 5 мА.

Також проведені циклічні вольт амперні характеристики (рис. 4) на яких видно, що хвилеподібних викидів немає, а це говорить

про відсутність домішок і в заряд-розрядних процесах роботи СК немає фарадеевських процесів.

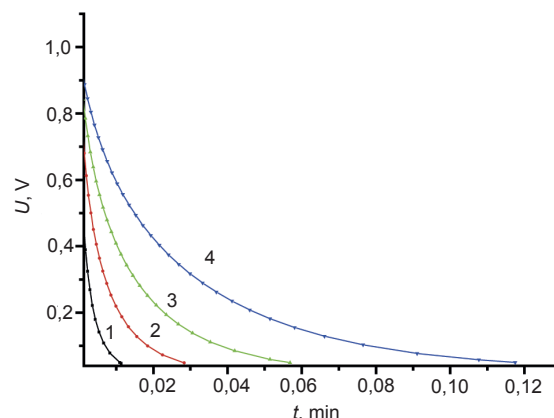


Рис. 3. Залежність часу розряду СК від опору навантаження 1 — $R = 10$ Ом, 2 — $R = 20$ Ом, 3 — $R = 50$ Ом, 4 — $R = 100$ Ом

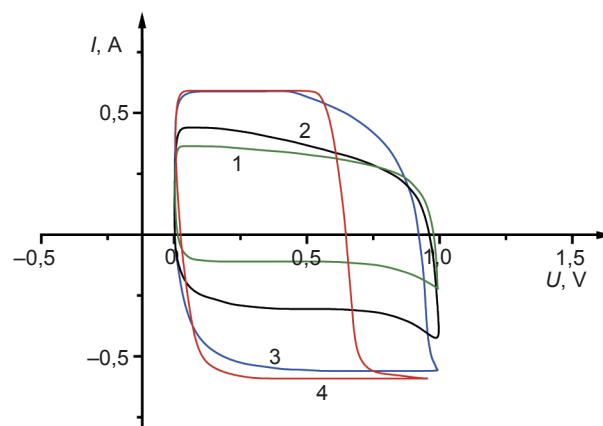


Рис. 4. Вольтамперні характеристики досліджуваного СК при різних швидкостях сканування: 1 — 5 мВ/с, 2 — 10 мВ/с, 3 — 20 мВ/с, 4 — 50 мВ/с

ВИСНОВОК

Отриманий нанопористий вуглецевий матеріал з органічної сировини (шкурки апельсина) має достатньо високу питому ємність (160 Ф/г) та в режимах роботи СК на основі цього матеріалу дослідження показали, що не протікають фарадеевські та хімічні процеси, а накопичення заряду відбувається за рахунок утворення подвійного шару Гельмгольца.

Проведені дослідження макетних зразків з отриманого вуглецевого матеріалу з шкурки апельсину з 30 % водним розчином електроліту КОН вказують, що даний матеріал може бути використаний в якості електродних матеріалів в суперконденсаторах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Conway B. E. *Electrochemical supercapacitors // Scientific Fundamentals and Technological Applications*. Kluwer Academic. — New York, 1999.
2. Subramanian V., Cheng Luo, Stephan A. M., Nahm K. S., Sabu Thomas, and Bingqing Wei, *Supercapacitors from Activated Carbon Derived from Banana Fibers // J. Phys. Chem. C*. — 2007. — Vol. 111. — С. 7527–7531.
3. Ковалюк З. Д., Юрценюк С. П., Семенчук І. І., *Пористий вуглецевий матеріал з рослинної сировини як поляризаційна складова електродів суперконденсаторів // Журнал нано- та електронної фізики*. — 2015. — Т. 7, № 2, 02017(3 с.).
4. Abdelhakim Elmouwahidi, Zulamita Zapata-Benabithé, Francisco Carrasco-Marín, Carlos Moreno-Castilla, *Activated carbons from KOH-activation of argan (Argania spinosa) seed shells as supercapacitor electrodes // Bioresource Technology*. — 2012. — Vol. 111. — P. 185–190.
5. Rufford T. E., Hulicova-Jurcakova D., Zhu Z., Lu G. Q. *Nanoporous carbon electrode from waste coffee beans for high performance supercapacitors // Electrochem. Commun.* — 2008. — Vol. 10. — P. 1594–1597.
6. Бухаров В. А., Ковалюк З. Д., Нетяга В. В., Юрценюк С. П., *Углеродный материал из растительного сырья для электродов суперконденсаторов // Электрохимическая энергетика* 8. — 2008. — Т. 111, № 2.
7. Frackowiak E. *Carbon materials for supercapacitor application // Phys. Chem. Chem. Phys.* — 2007. — Vol. 9. — P. 1774–1785.
8. Pandolfo A. G., Hollenkamp A. F. *Carbon properties and their role in supercapacitors // J Power Sources*. — 2006. — Vol. 157. — P. 11–27.

LITERATURA

1. Conway B. E. *Electrochemical supercapacitors // Scientific Fundamentals and Technological Applications*. Kluwer Academic. — New York, 1999.
2. Subramanian V., Cheng Luo, Stephan A. M., Nahm K. S., Sabu Thomas, and Bingqing Wei, *Supercapacitors from Activated Carbon Derived from Banana Fibers // J. Phys. Chem. C*. — 2007. — Vol. 111. — P. 7527–7531.
3. Kovalyuk Z. D., Yurcenyuk S. P., Semenchuk I. I. *Poristij vuglecevij material z roslinnoї sirovini yak polyarizacijna skladova elektrodov superkondensatoriv // zhurnal nano- ta elektronnoї fiziki*. — 2015. — Vol. 7, No. 2, 02017(3 с.)
4. Abdelhakim Elmouwahidi, Zulamita Zapata-Benabithé, Francisco Carrasco-Marín, Carlos Moreno-Castilla. *Activated carbons from KOH-activation of argan (Argania spinosa) seed shells as supercapacitor electrodes // Bioresource Technology*. — 2012. — Vol. 111. — P.185–190.
5. Rufford T. E., Hulicova-Jurcakova D., Zhu Z., Lu G. Q. *Nanoporous carbon electrode from waste coffee beans for high performance supercapacitors // Electrochem. Commun.* — 2008. — Vol. 10. — P. 1594–1597.
6. Buharov V. A., Kovalyuk Z. D., Netyaga V. V., Yurcenyuk S. P., *Uglerodnyj material iz rastitel'nogo syr'ya dlya elektrodov superkondensatorov // Elektrohimičeskaya energetika* 8. — 2008. — Vol. 111, No. 2.
7. Frackowiak E. *Carbon materials for supercapacitor application // Phys. Chem. Chem. Phys.* — 2007. — Vol. 9. — P. 1774–1785.
8. Pandolfo A. G., Hollenkamp A. F. *Carbon properties and their role in supercapacitors // J. Power Sources*. — 2006. — Vol. 157. — P. 11–27.

ВПЛИВ ЛАЗЕРНОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ПРОЦЕС ВПРОВАДЖЕННЯ ВОДНЮ В ШАРУВАТІ КРИСТАЛИ GaSe

В. Б. Боледзюк, З. Д. Ковалюк, М. М. Пирля, Р. Л. Поцілуйко

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
Чернівецьке відділення*

Надійшла до редакції 11.11.2015

В даній роботі представлено дослідження впливу лазерного опромінення зразків GaSe перед інтеркалюванням атомами водню. Досліджені спектри пропускання в області екситонного поглинання для опромінених та неопромінених водневих інтеркалатів GaSe. Встановлена залежність положення екситонного максимуму сполук впровадження від напрямку попереднього опромінення.

Ключові слова: водень, шаруватий кристал, інтеркаляція, опромінення.

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ВНЕДРЕНИЯ ВОДОРОДА В СЛОИСТЫЕ КРИСТАЛЛЫ GaSe

В. Б. Боледзюк, З. Д. Ковалюк, М. М. Пырля, Р. Л. Поцилуйко

В данной работе представлено исследование влияния лазерного облучения образцов GaSe перед интеркаляцией атомами водорода. Исследованы спектры пропускания в области экситонного поглощения для облученных и необлученных водородных интеркалатов GaSe. Установлена зависимость положения экситонного максимума соединений внедрения от направления предварительного облучения.

Ключевые слова: водород, слоистый кристалл, интеркаляция, облучения.

THE INFLUENCE OF LASER IRRADIATION ON THE PROCESS OF INTRODUCTION OF HYDROGEN IN LAYERED CRYSTALS GaSe

V. B. Boledzyuk, Z. D. Kovalyuk, M. M. Pyrlya, R. L. Potsiluiko

This article is a study of the effect of laser irradiation GaSe samples to intercalation by hydrogen atoms. The transmission spectra for of unirradiated and irradiated GaSe samples intercalated with hydrogen in the region of exciton absorption have been investigated. The dependence of position the excitonic maximum of compounds the towards the implementation of previous exposure has been established.

Keywords: hydrogen, layered crystal intercalation, irradiation.

ВСТУП

Актуальним напрямком на даний час є пошук та одержання нових матеріалів для функціональної електроніки і водневої енергетики з конкурентоздатними характеристиками (в порівнянні з балонним та криогенним методом зберігання). Одними з таких матеріалів являються шаруваті кристали бінарних сполук A^3B^6 з їх здатністю до інтеркаляції сторонніми атомами, іонами чи молекулами, кількість яких може бути порівняною або й перевищувати число молекул основної речовини [1–3]. Водень, як інтеркалюючий агент особливо цікавий для вивчення механізмів інтеркалювання, структури та фізичних властивостей отриманих сполук впровадження в досить широких межах. В цьому випадку

можна виділити два важливих аспекти. По-перше, водень виступаючи в якості домішки, дозволяє плавно (а в більшості випадків і обернено) змінювати властивості кристалічної матриці. По-друге, атоми водню, утворюючи власну підсистему, сильно взаємодіють між собою, причому ця взаємодія носить дальньодіючий характер. Крім того, атоми водню володіють достатньо високою дифузійною рухливістю; воднева підгратка може проявляти квантові властивості навіть при кімнатній температурі.

Процеси оберненого впровадження водню в шаруваті кристали A^3B^6 дозволяють отримувати нові функціональні матеріали різноманітного призначення. Водневі інтеркаляційні системи можуть бути використані

для створення нового класу водень містких матеріалів з підвищеним вмістом водню, сенсорів, паливних елементів, тощо [4, 5]. Перевагами шаруватих кристалів A^3B^6 перед відомими матеріалами, які використовуються у водневій енергетиці, можуть стати їх хімічна стабільність і значно більша оборотність процесів впровадження водню в кристалічні матриці.

Метою даної роботи було вивчення можливості збільшення кількості впровадженого в шаруваті кристали A^3B^6 водню за допомогою попереднього опромінення вихідних зразків.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

В якості вихідних зразків для опромінення та подальшого інтеркалювання використовували монокристали GaSe. Їх вирощували методом Бріджмена з розплаву стехіометричного складу. Отримані матеріали характеризувались шаруватою структурою по всій довжині зливка. Проведений рентгенівський аналіз показав, що кристали GaSe характеризуються ромбоєдричною структурою ϵ -політипу (просторова група D_{3h}^1), параметри кристалічної ґратки становили $a = 3,755 \text{ \AA}$, $c = 15,9451 \text{ \AA}$. Зразки для інтеркалювання отримували з монокристаличних зливків простим сколюванням вздовж площини шарів, їх розміри становили $5 \times 5 \times 2,5 \text{ мм}^3$. Електрохімічне впровадження водню в зразки GaSe проводили методом «тягнучого» електричного поля [3, 6] в гальваностатичному режимі за допомогою потенціостату П-5827М. Для впровадження водню використовували трьохелектродну електрохімічну комірку (система: робочий електрод (шаруватий кристал) — електроліт — інертний проти електрод), а в якості електроліту — 0,1-нормальний водний розчин HCl. Пропускаючи через комірку електричний струм необхідної величини, здійснювали процес інтеркалювання атомів водню в шаруватий кристал (при катодній поляризації останнього). Концентрація впровадженого водню визначалась по кількості електрики, яка пройшла через комірку, тобто контрольованими параметрами в процесі реакції впровадження являлись густина струму j та тривалість процесу t . Використання оптимальних технологічних параметрів процесу

інтеркалювання (густина струму не більше 10 мкА/см^2) дозволило отримати однорідні по складу інтеркальовані зразки.

З метою підвищення кількості впровадженого водню в шаруваті кристали, були досліджені сполуки впровадження водню на основі попередньо опромінених монокристалів GaSe. В якості джерела світла використовувався лазер ГОС-301 (довжина хвилі $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$). Опромінювання монокристаличних зразків GaSe проводилося одноразовим імпульсом потужністю 25 Дж/см^2 для двох випадків орієнтації зразка: перпендикулярно площині шарів зразка (\perp) і паралельно шарам (\parallel).

Дослідження спектрів пропускання опромінених та неопромінених кристалів GaSe та їх інтеркалатів $H_x\text{GaSe}$ (x — кількість атомів впровадженого водню на одну формульну одиницю матриці) проводились в області краю фундаментального поглинання на спектрометричній установці, зібраній на базі модифікованого спектрометра ИКС-31 (напрямок розповсюдження світла перпендикулярно базовій площині кристалу). Розрізна здатність приладу в досліджуваній спектральній області становила $0,6\text{--}1,2 \text{ меВ}$. За допомогою терморегульованої кріостатної системи «УТРЕКС-РТР» проведені дослідження спектрів пропускання в інтервалі температур $77\text{--}293 \text{ К}$. При вимірюванні спектрів пропускання використовували зразки товщиною $10\text{--}20 \text{ мкм}$.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Для реєстрації впливу лазерного опромінення на процес впровадження водню в шаруваті кристали проведені вимірювання спектрів пропускання в області екситонного поглинання при $T = 77 \text{ К}$ для опромінених та неопромінених зразків GaSe та $H_x\text{GaSe}$ ($x = 0,2; 0,35; 0,5$) та досліджено залежність спектрального положення екситонного максимуму $E_{\text{екс}}(n = 1)$ даних зразків. Результати цих досліджень представлені в таблиці та на рис. 1.

Беручи до уваги попередні дослідження водневих інтеркалатів GaSe [6] з отриманих експериментальних даних можна зробити висновок, що попереднє лазерне опромінення кристалів GaSe перпендикулярно до шарів перед процесом інтеркаляції приводить до

Залежність спектрального положення екситонного максимуму $E_{\text{екс}}$ сполук впровадження H_xGaSe від напрямку попереднього опромінення зразка

Зразок	$E_{\text{екс}}, \text{eV}$		
	неопромінений	опромінений площині шарів	опромінений \perp площині шарів
GaSe	2,099	2,099	2,100
$\text{H}_{0,2}\text{GaSe}$	2,1016	2,101	2,1027
$\text{H}_{0,35}\text{GaSe}$	2,102	2,1014	2,1038
$\text{H}_{0,5}\text{GaSe}$	2,1027	2,1017	2,1046

приводить до зростання кількості впровадженого водню у 2–2,5 рази та збільшення величини зсуву енергетичного положення екситонного максимуму для інтеркальованих зразків H_xGaSe . Слід також зауважити, що даний ефект не проявляється для попередньо опромінених паралельно площині шарів сполук впровадження H_xGaSe ($x \leq 0,5$). Враховуючи незначну зміну положення $E_{\text{екс}}$ для опромінених зразків GaSe порівняно з неопроміненими, збільшення значення $E_{\text{екс}}$ для попередньо опромінених інтеркальованих зразків H_xGaSe в порівнянні з неопроміненими є непрямим доказом зростання впливу впровадженого водню при незмінних режимах інтеркаляції, тобто згідно «еталонної» залежності $E_{\text{екс}}(x)$ для $\text{H}_{0,2}\text{GaSe}_{\perp}$ відповідає інтеркалату $\text{H}_{0,5}\text{GaSe}$, а для $\text{H}_{0,35}\text{GaSe}_{\perp}$ – $\text{H}_{0,7}\text{GaSe}$.

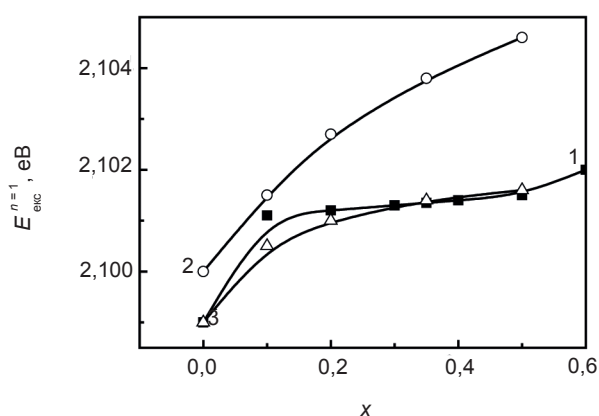


Рис. 1. Концентраційні залежності енергетичного положення основного екситонного максимуму $E_{\text{екс}}^1$ ($n = 1$) неопромінених (1) та попередньо опромінених перпендикулярно (2) та паралельно (3) площині шарів водневих сполук впровадження H_xGaSe при $T = 77 \text{ K}$

Переважаючий зсув $E_{\text{екс}}^1$ ($n = 1$) у високоенергетичну область для $\text{H}_x\text{GaSe}_{\perp}$ в порівнянні

з неопроміненими зразками H_xGaSe , а також підсилення смуг екситонного поглинання внаслідок лазерного опромінення, яке спостерігалось при вимірюванні, можна пояснити наступним чином. При лазерному опроміненні внаслідок теплового нагріву, можливо, відбувається процес дефектоутворення [7]. Слід також враховувати, що з ростом концентрацій дефектів та домішок, зростає і концентрація вільних носіїв, які екрануючи кулонівську взаємодію електрона та дірки в екситоні, зменшують енергію їх зв'язку. Крім цього, зростає розсіювання екситонів на дефектах. Ці два ефекти при відповідній концентрації впровадженої домішки приводять до переважаючого зсуву екситонної лінії в $\text{H}_x\text{GaSe}_{\perp}$.

ВИСНОВОК

Показано, що попереднє (перед впровадженням) опромінення шаруватих кристалів перпендикулярно площині шарів призводить до зростання кількості впровадженого водню у 2–2,5 рази та збільшує величину енергетичного зсуву $E_{\text{екс}}$ порівняно з неопроміненими зразками, що є непрямим свідченням зростання впливу впровадженого водню.

ЛІТЕРАТУРА

- Товстюк К. Д. Полупроводниковое материаловедение — К.: Наукова думка, 1984. — 264 с.
- Григорчак И. И., Ковалюк З. Д., Юрченко С. П. Получение и свойства интеркальированных слоистых соединений типа A^3B^6 // Изв. АН СССР. Сер. Неорган. матер. — 1981. — Т. 17, № 3. — С. 412–415.
- Ковалюк З. Д., Пырля М. Н., Середюк А. И., Товстюк К. Д. Фазы внедрения при интер-

- калировании слоистых соединений типа A^3B^6 // Неорган. материалы. 1985. — Т. 23, № 10. — С. 1652–1655.
4. Алефельд Г., Фелькль И. Водород в металлах: В 2 т. — М.: Мир, 1981.
 5. Yu. I. Zhirko, Kovalyuk Z. D., Pyrlja M. M., Boledzyuk V. B. Application of layered InSe and GaSe crystals and powders for solid state hydrogen storage // Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials. [eds. T. N. Vezirogly et al.]. — Netherlands: Springer, 2007. — P. 325–340.
 6. Ковалюк З. Д., Пирля М. М., Боледзюк В. Б. Вплив водню на оптичні властивості GaSe // ЖФД. — 2002. — Т. 6, № 2. — С. 185–187.
 7. Шаблій І. Ю. Дефектообразование в кристаллах сульфида кадмия под действием лазерного излучения. // Дис. канд. физ. -мат. наук: 01.04.10. — К., 1984. — 162 с.
- LITERATURA**
1. Tovstyuk K. D. Poluprovodnikovoe materialovedenie — K.: Naukova dumka, 1984. — 264 p.
 2. Grigorochak I. I., Kovalyuk Z. D., Yurcenyuk S. P. Poluchenie i svojstva interkalirovannyh sloistykh soedinenij tipa A^3B^6 // Izv. AN SSSR. Ser. Neorgan. mater. — 1981. — Vol. 17, No. 3. — P. 412–415.
 3. Kovalyuk Z. D., Pyrlja M. N., Seredyuk A. I., Tovstyuk K. D. Fazy vnedreniya pri interkalirovanii sloistykh soedinenij tipa A^3V^6 // Neorgan. materialy. 1985. — Vol. 23, No. 10. — P. 1652–1655.
 4. Alefel'd G., Fel'kl' I. Vodorod v metallah: V 2 t. — M.: Mir, 1981.
 5. Yu. I. Zhirko, Kovalyuk Z. D., Pyrlja M. M., Boledzyuk V. B. Application of layered InSe and GaSe crystals and powders for solid state hydrogen storage // Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials. [eds. T. N. Vezirogly et al.]. — Netherlands: Springer, 2007. — P. 325–340.
 6. Kovalyuk Z. D., Pirlya M. M., Boledzyuk V. B. Vpliv vodnyu na optichni vlastivosti GaSe // ZhFD. — 2002. — Vol. 6, No. 2. — P. 185–187.
 7. Shabl'ij I. Yu. Defektoobrazovanie v kristallah sul'fida kadmiya pod dejstviem lazernogo izlucheniya. // Dis. kand. fiz. -mat. nauk: 01.04.10. — K., 1984. — 162 p.

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ПОЛІМЕРНИХ НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ОЛІГОГЛІКОЛІВ ТА ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК

Е. А. Лисенков¹, В. В. Клепко²

¹Миколаївський національний університет ім. В. О. Сухомлинського,
Миколаїв, Україна,

²Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України,
Київ, Україна

Надійшла до редакції 20.11.2015

Використовуючи методи математичного моделювання проаналізовано основні теоретичні моделі електропровідності полімерних наноконкомпозитів та їх відповідність експериментальним результатам для систем поліетер-вуглецеві нанотрубки. Встановлено, що моделі, які не враховують існування порогу перколяції (модель Рагамана-Чакі-Хастгіра та модель перколяції з тунелюванням) не можуть використовуватися для точного опису експериментальних даних. Виявлено, що модель Фур'є демонструє гарну відповідність експерименту, проте застосовна лише для систем у яких спостерігається великий стрибок електропровідності при досягненні порогу перколяції, тобто систем з низькою власною електропровідністю. **Ключові слова:** перколяційна поведінка, полімерні наноконкомпозити, електропровідність, вуглецеві нанотрубки, теоретичні моделі електропровідності.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ОЛИГОГЛИКОЛЕЙ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Э. А. Лысенков, В. В. Клепко

Используя методы математического моделирования, проанализированы основные теоретические модели электропроводимости полимерных наноконкомпозитов и их соответствие экспериментальным результатам для систем простой полиэфир-углеродной нанотрубки. Установлено, что модели, которые не учитывают существования порога перколяции (модель Рагамана-Чакки-Хастгира и модель перколяции с тунелированием) не могут использоваться для точного описания экспериментальных данных. Обнаружено, что модель Фурье демонстрирует хорошее соответствие с экспериментом, однако применимая лишь для систем в которых наблюдается большой прыжок электропроводимости при достижении порога перколяции, то есть систем с низкой собственной электропроводимостью.

Ключевые слова: перколяционное поведение, полимерные наноконкомпозиты, электропроводимость, углеродные нанотрубки, теоретические модели электропроводимости.

THEORETICAL ANALYSIS OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF POLYMERIC NANOCOMPOSITESE BASED ON OLIGOGLYCOLS AND CARBON NANOTUBES

E. A. Lysenkov, V. V. Klepko

The basic theoretical models of electrical conductivity of polymer nanocomposites and their accordance to experimental results are analysed for the systems based on polyethers and carbon nanotubes using the methods of mathematical simulation. It is set that models which do not take into account existence of percolation threshold (Rahaman-Chaki-Khastgir model and tunneling percolation model) and can't be using for exact definition of experimental data. It is discovered that the Fourier model demonstrates a good accordance with an experiment, however it is applicable only for the systems in which a large increase of conductivity under reaching the percolation threshold is observed, that systems with low own conductivity.

Keywords: percolation behavior, polymer nanocomposites, electrical conductivity, carbon nanotubes, theoretical models of conductivity.

ВСТУП

За останні декілька десятиліть композитні матеріали привертають значну увагу науковців та промисловців через їх економічну важливість, легкість переробки та екологічну стабільність [1]. Найбільшу цікавість як для фізики полімерів так і для виробництва викликають полімерні наноккомпозити — новий клас матеріалів, що складаються із полімерної матриці та наповнювачів, які є нанорозмірними [2]. На відміну від композитних систем, полімерні наноккомпозити володіють покращеними фізичними властивостями, такими як висока тепло- та електропровідність і механічна міцність. У наноккомпозитах, взаємодія між нанонаповнювачем та полімерною матрицею відбувається на молекулярному рівні. Властивості матричного полімеру та нанонаповнювача, їх кількість та розподіл наповнювача значно впливають на взаємодії між частинками наповнювача та полімером.

Важливою задачею фізики полімерних наноккомпозитів є визначення порогу перколяції, тобто мінімального вмісту наповнювача, при якому утворюється «неперервний» кластер; при цьому відбувається різкий стрибок більшості властивостей матеріалу [3]. На сьогодні, відкритим питанням залишається можливість впливати на утворення перколяційних кластерів, а отже і на величину порогу перколяції. Вирішення даної проблеми забезпечило б можливості створювати наноккомпозити з наперед заданим порогом перколяції та рівнем електропровідності, що б значно розширило сферу застосування таких матеріалів. Для створення електропровідних наноккомпозитів використовуються різні наповнювачі. Однак, високий вміст або великий розмір наповнювача приводять до суттєвого погіршення механічних властивостей та можливостей переробки даних матеріалів [4]. Тому важливим напрямком розвитку фізики полімерних наноккомпозитів є зниження порогу перколяції, яке б не приводило до погіршення механічних властивостей системи.

В даний час, недостатньо дослідженими залишаються фізичні процеси, які відбуваються у електропровідних перколяційних

кластерах та сітках із нанонаповнювачів, що розподілені у полімерній матриці. Проведено багато чисельних та експериментальних досліджень метою яких було зниження порогу перколяції та встановлення мінімальної кількості наповнювача при якій система досягає максимальної електропровідності [5]. Проте, дуже складною задачею є розділення впливу розмірів нанонаповнювача та їх розподілу у полімерній матриці на перколяційні властивості наноккомпозитів, тому що вплив цих факторів взаємопов'язаний [6]. Так, наприклад, вплив розмірів частинок на перколяційну поведінку наноккомпозитів складно точно встановити через неможливість оцінки рівномірності розподілу наповнювача у матриці. Фундаментальне розуміння впливу фізичних властивостей наповнювачів та методів приготування на перколяційну поведінку електропровідних композитів залишається повністю не вивченим.

Тому метою даної роботи був аналіз основних теоретичних моделей електропровідності полімерних наноккомпозитів та їх застосування для опису експериментальних даних на прикладі модельних систем на основі поліетерів та ВНТ.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА**Модель Рагамана-Чакі-Хастгіра (модель Р-Ч-Х)**

Запропоновані у роботах теоретичні моделі електропровідності Буче [7] та Скарісбріка [8] ґрунтуються на гелеутворенні у полімері та статистичній ймовірності утворення електропровідної сітки з нанонаповнювача відповідно. Проте вони мають значні обмеження. Автори роботи [9] покладали в основу два основних припущень попередніх моделей Буче та Скарісбріка. Математичне рівняння, на якому базується дана модель, має вигляд:

$$\log \sigma_{DC} = \frac{p_m \log \sigma_m + p_f \log \sigma_f}{p_m \exp(p_f) + p_f \exp(p_m)} \quad (1)$$

У формулу (1) для моделі Р-Ч-Х входять чотири параметри, які по своїй суті є постійними величинами. Однак, ця модель

не враховує основні морфологічні особливості системи, такі як аспектне відношення, рівномірність розподілу, агрегація, орієнтація наповнювача тощо. Проте, як відомо, морфологічні параметри мають визначальний вплив на поріг перколяції та величину електропровідності полімерних нанокомпозитів [10]. Саме тому автори роботи [9] запропонували модифікувати модель Р-Ч-Х, помноживши об'єму частку наповнювача на параметр, який був названий морфологічним фактором M . Основне рівняння модифікованої Р-Ч-Х моделі записується як:

$$\log \sigma_{DC} = \frac{p_m \log \sigma_m + Mp_f \log \sigma_f}{p_m \exp(Mp_f) + Mp_f \exp(p_m)} \quad (2)$$

Модель перколяції з тунелюванням

Враховуючи ефекти тунелювання при утворенні перколяційного кластера у наповнених полімерних системах Жу та ін. запропонували модель перколяції з тунелюванням [11]. У рамках даної моделі частинки, введені до складу полімерного нанокомпозиту, є складеними сферичними частинками і представляються у вигляді електропровідного ядра та полімерної оболонки товщиною до 10 нм, через яку можуть тунелювати електрони. Полімерна оболонка приймає участь у перенесенні зарядів, тому її існування значно розширює ефективний об'єм частинок, при цьому перколяційні кластери утворюються при менших концентраціях наповнювача.

Таку систему складених частинок можна описати типовою моделлю ядро-оболонка для багатьох частинок. Об'ємний вміст Φ наповнювача у моделі ядро-оболонка з об'ємним вмістом ядер ϕ (реальний вміст частинок наповнювача), радіусом ядра r та товщиною оболонки τ визначається як [12]:

$$\Phi_{eq} = 1 - (1 - \phi) \exp \left[\frac{\phi(1 - \lambda^{-3})}{(1 - \phi)^3} \right] \exp \left\{ - \frac{\phi^2 \lambda^{-3} (\lambda - 1)}{2(1 - \phi)^3} \times \left[(7\lambda^2 + 7\lambda - 2) - 2\phi(7\lambda^2 - 5\lambda + 1) + \phi^2(5\lambda^2 - 7\lambda + 2) \right] \right\}, \quad (3)$$

де $\lambda = r/(r + \tau)$. Модель ядро-оболонка є одним із прикладів континуальної перколяції. Для даної моделі, поріг перколяції Φ_{eq}^c — це критична концентрація наповнювача, при якій утворюється неперервна сітка із частинок наповнювача через всю систему. Однак, аналітичного виразу для знаходження Φ_{eq}^c не існує. Запропоновані у роботах [11, 12] вирази для знаходження не є Φ_{eq}^c універсальними і підбираються для певного типу частинок. Розрахований за цими виразами поріг перколяції становить приблизно 30–40 %, що для нанокомпозитних систем є значно завищеним.

Основа на припущенні існування складених частинок та теорії критичної перколяції, модель перколяції з тунелюванням для розрахунку ефективної електропровідності системи полімер-наповнювач має вигляд:

$$\sigma_{DC} = \sigma_{eq} \left(\frac{\Phi_{eq} - \Phi_{eq}^c}{1 - \Phi_{eq}^c} \right)^t, \quad (4)$$

де σ_{eq} — еквівалентна електропровідність, яка залежить від електропровідностей ядра частинки та полімерної оболонки, t — універсальний критичний індекс, який при ідеальному контакті та рівномірному розподілі складених частинок у композиті рівний 2.

За даними авторів [11] за допомогою запропонованої моделі можливо передбачити зміну електропровідності системи у всьому діапазоні концентрацій наповнювача. Так для системи Ni/SiO₂ модель добре описує експеримент, враховуючи навіть утворення двох перколяційних переходів, де спочатку перколюють оболонки складеного наповнювача, а потім їх ядра. Для опису ефекту подвійної перколяції у моделі перколяції з тунелюванням припускається, що параметр σ_{eq} не є константою, залежить від вмісту наповнювача. У такому випадку, σ_{eq} визначається складними формулами, наведеними у [11].

Модель контактуючих волокон

Модель контактуючих волокон була запропонована Вебером та Камалем та [13] для обчислення об'ємного опору армованих волокнами композитів. Дана модель враховує мікроструктурні параметри, такі як концентрація наповнювача і його розмірність, аспектне відношення та орієнтація волокон. У своїй моделі Вебер та Камал припустили, що електропровідність полімерної матриці є настільки малою, що не впливає на загальну електропровідність композиту. У такому випадку дана модель має значні обмеження для опису наповнених систем на основі полімерної матриці з високою власною електропровідністю. Для розширення області застосування даної моделі Тайпалус та ін. [14] запропонували врахувати електропровідність полімерної матриці. Основне рівняння моделі контактуючих волокон записується у вигляді:

$$\sigma_{DC} = \sigma_m + \left[\frac{4d_c l \varphi_p \sigma_f \cos^2 \theta}{\pi d^2} X \right], \quad (5)$$

де, σ_{DC} , σ_m та σ_f — електропровідності композиту, матриці та наповнювача відповідно, d — діаметр волокна, l — довжина волокна, d_c — діаметр області контакту, θ — кут орієнтації волокон.

У моделі передбачається, що основним типом контактів між волокнами є не контакт типу «кінець до кінця», а, ймовірніше, контакти типу «тіло до кінця» або «тіло до тіла» [15]. Область контакту для цих двох випадків набагато менша, ніж при утворенні контактів типу «кінець до кінця», що значно проявляється на загальній електропровідності композиту. Крім цього, модель контактуючих волокон базується на припущенні, що частинки мають плоску круглу область контакту [14]. Діаметр цієї круглої області d_c має дуже маленьке значення, і його не можливо точно виміряти. Значення d_c можна оцінити шляхом співставлення експериментальних та розрахованих даних за допомогою даної моделі, а потім використовувати це значення для всіх інших зразків з різними вмістом однакового наповнювача.

Величина φ_p показує об'ємну частку волокон наповнювача, що беруть участь

в утворенні електричних провідних шляхів. Тільки волокна, які формують провідну сітку, впливають на електропровідність композитної системи. Решта волокон оточуються матрицею і, фактично перебуваючи в ізоляції, не покращують електропровідність. Величину φ_p можна визначити як:

$$\varphi_p = \beta \varphi_f, \quad (6)$$

де φ_f — об'ємна частка волокон наповнювача, β — фактор, що показує, яка частина волокон бере участь в утворенні провідної сітки. При вмісті наповнювача нижчому за поріг перколяції φ_c , $\beta = 0$, тому що волокна не контактують між собою. Об'ємна частка «насичення» φ_t характеризує стан системи в якій достатньо волокон наповнювача, щоб утворити як мінімум один досконалий провідний канал. Ця величина оцінюється з результатів вимірювань електропровідності і дорівнює вмісту наповнювача після порогу перколяції, при якому провідність системи майже не змінюється. При вмісті наповнювача більшому за φ_t , параметр $\beta = 1$, а $\varphi_p = \varphi_f$. Для концентрацій наповнювача в області $\varphi_c < \varphi_f < \varphi_t$, β можна обчислити як:

$$\beta = \frac{\varphi_f - \varphi_c}{\varphi_t - \varphi_c}, \quad (7)$$

де X — фактор, який залежить від числа контактів волокон наповнювачів між собою. Вебер та ін. [13] запропонували математичне співвідношення між величинами X та m .

$$X = 0,59 + 0,15m, \quad (8)$$

де m — число контактів, яке розраховується за наступним виразом:

$$m = m_{\max} \left(\frac{\varphi_p}{\varphi_t} \right). \quad (9)$$

Для більшості систем, максимальне число контактів становить 15 [13].

Модель Фур'є

Фур'є та ін. запропонували аналітичну модель, яка ґрунтується на розподілу Фермі-Дірака та описує перехід діелектрик-провідник.

Основне рівнянням даної моделі записується як [16]:

$$\log(\sigma_{DC}) = \log(\sigma_f) + \frac{\log(\sigma_m) - \log(\sigma_f)}{1 + \exp[b(p - p_c)]}, \quad (10)$$

де σ_{DC} , σ_f , σ_m — електропровідність композиту, наповнювача і полімерної матриці, відповідно, p — вміст наповнювача, b — емпіричний параметр, який приводить до зміни електропровідності системи при досягненні порогу перколяції p_c .

Загалом, модель Фур'є є дуже подібною до сигмоїдальної моделі і за «S»-подібною формою, яка якісно відповідає типовій перколяційній кривій, і за впливом більшості параметрів на значення загальної електропровідності системи. Основним варіативним параметром моделі Фур'є є параметр b , який змінює форму кривої.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для встановлення відповідності теоретичних моделей та експерименту, використовували експериментальні результати концентраційної залежності електропровідності для систем на основі поліетиленгліколю-400 (ПЕГ-400–ВНТ) [17], поліпропіленгліколю-400 (ППГ-400–ВНТ) [18] та поліетиленгліколю-10000 (ПЕГ-10000–ВНТ) [19].

На рис. 1. приведені результати моделювання експериментальних результатів електропровідності для систем поліетер-ВНТ у рамках модифікованої моделі Р-Ч-Х. За даними авторів роботи [20], які проаналізували ряд експериментальних результатів електропровідності систем полімер-наповнювач модель добре корелює із експериментом. Однак, за результатами моделювання систем поліетер-ВНТ (рис. 1), модифікована модель Р-Ч-Х показує погану відповідність експерименту. Це пояснюється значним обмеженням даної моделі, яка не враховує існування порогу перколяції. Тому, за допомогою даної моделі можна описати електропровідність нанонаповнених систем лише після порогу перколяції. Однак, як видно з рис. 1, модифікована модель Р-Ч-Х не описує експериментальні дані навіть на ділянці кривої після порогу перколяції. Автори роботи [20]

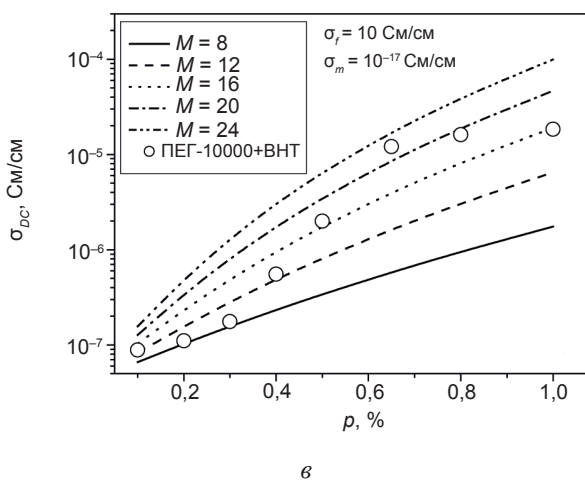
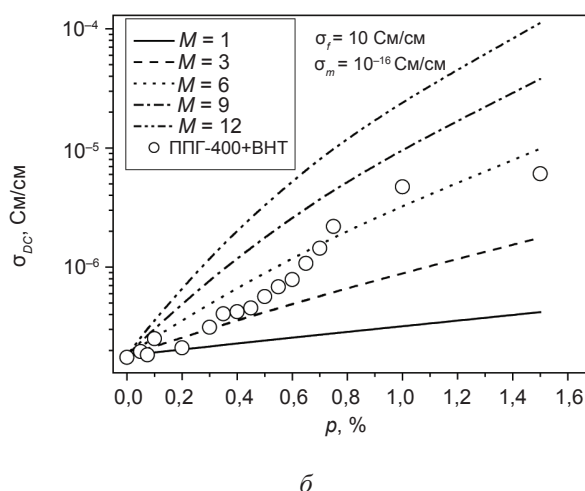
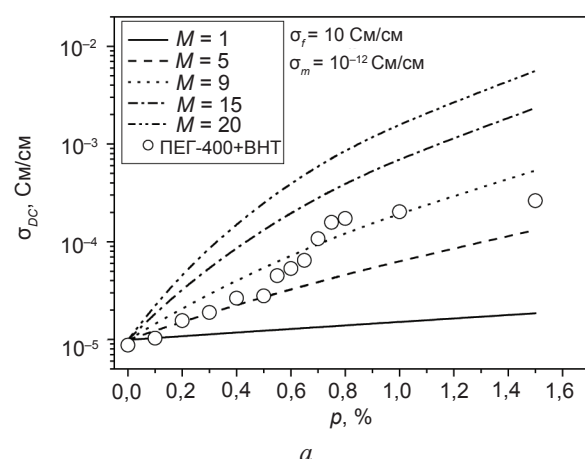


Рис. 1. Промодельовані за допомогою рівн. (2) експериментальні дані для нанонаповнених систем на основі ПЕГ-400 (а), ППГ-400 (б), ПЕГ-10000 (в). Лінії — модель Р-Ч-Х

також стверджують, що для наповнених полімерних систем справедливе співвідношення $M \times p_c \approx 0,2$. Однак, добуток, визначених за допомогою моделювання, значень морфологічного фактора M на поріг перколяції для систем поліетер-ВНТ, складає 0,09, 0,06 та 0,128 для систем на основі ПЕГ-400, ППГ-400 та ПЕГ-10000, відповідно. Ще одним

недоліком цієї моделі є те, що для її підгонки треба використовувати дуже низькі значення електропровідності полімерної матриці. Це обмежує застосування даної моделі для опису систем на основі полімерів з високою власною електропровідністю.

На рис. 2. показано моделювання електропровідності систем поліетер-ВНТ у рамках моделі перколяції з тунелюванням. При

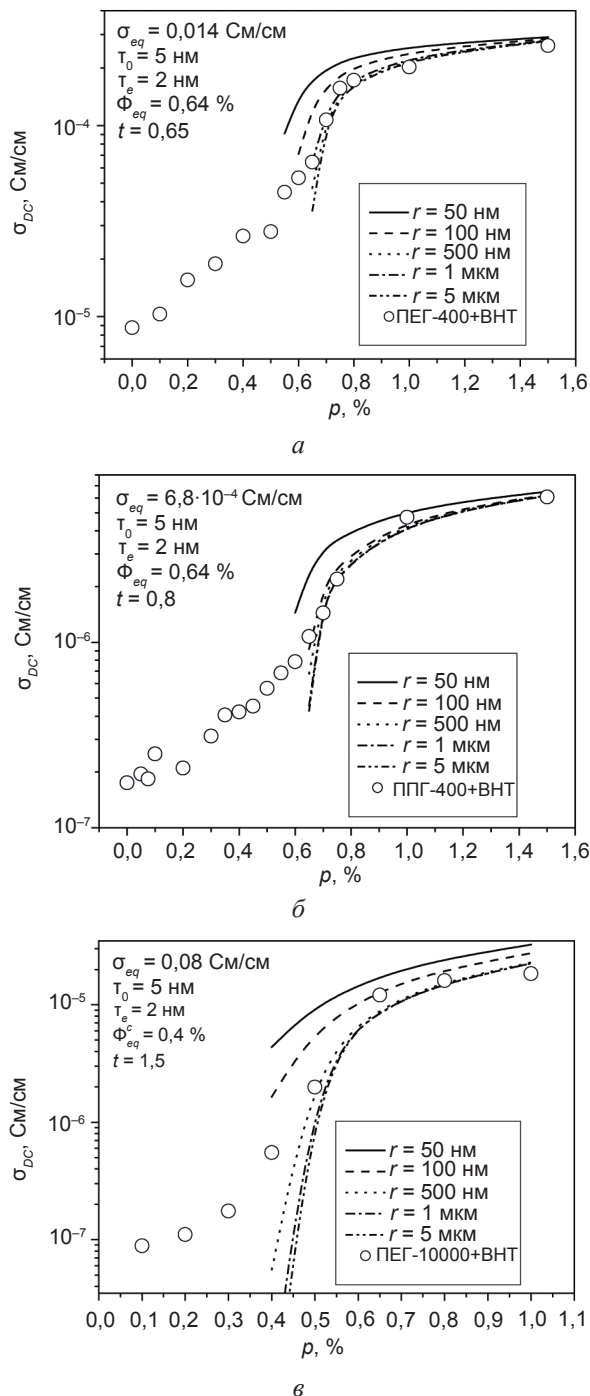


Рис. 2. Промодельовані за допомогою рівн. (4) експериментальні дані для нанонаповнених систем на основі ПЕГ-400 (а), ППГ-400 (б), ПЕГ-10000 (в). Лінії — модель перколяції з тунелюванням

описі експериментальних даних для систем поліетер-ВНТ за допомогою даної моделі, приймали, що σ_{eq} є константою та не залежить від вмісту наповнювача в області малих концентрацій. Оскільки модель описує перколяційну поведінку систем, які наповнені лише сферичними частинками, складність викликає оцінка радіуса частинки, оскільки нанотрубка має дуже витягнуту форму. Для розрахунків, опираючись на дослідження авторів роботи [21], було прийнято, що нанотрубки існують у згорнутій, а не витягнутій формі, тому їх можна представити у вигляді сферичних частинок. Як встановлено у роботі [21], діаметр такої згорнутої нанотрубки становить 0,17 μ m та 1,14 μ m для одношарових та багатшарових ВНТ відповідно.

З рис. 2, видно, що модель перколяції з тунелюванням добре описує експериментальні дані лише в області концентрацій більших за поріг перколяції. Також модель обмежена описом полімерних систем, які містять лише частинки сферичної форми, що утруднює її використання для об'єктів, які не здатні утворювати сферичні структури, наприклад графен, орієнтовані ВНТ тощо.

На рис. 3. представлені результати аналізу моделі контактуючих волокон. Згідно з рис. 3 а-б, функція моделі контактуючих волокон при зміні деяких її параметрів дуже подібна до типової перколяційної кривої. Вона враховує структурні особливості частинок наповнювача, їх орієнтацію у просторі, а також кількість і площу прямих контактів між ними. Однак, при її застосуванні для опису експериментальних даних систем на основі поліетерів, модель показує погану відповідність експерименту (рис. 3 в). Причина такої розбіжності теорії та експерименту полягає в тому, що у системах на основі поліетерів стрибок електропровідності після досягнення порогу перколяції становить 1-2 порядки. При детальному аналізі функції моделі контактуючих волокон було встановлено, що для адекватного кількісного опису експериментальних даних стрибок електропровідності після досягнення порогу перколяції повинен становити не менше 5 порядків. Тому, дану модель можна використовувати для опису систем на основі полімерних матриць з надзвичайно низькою власною

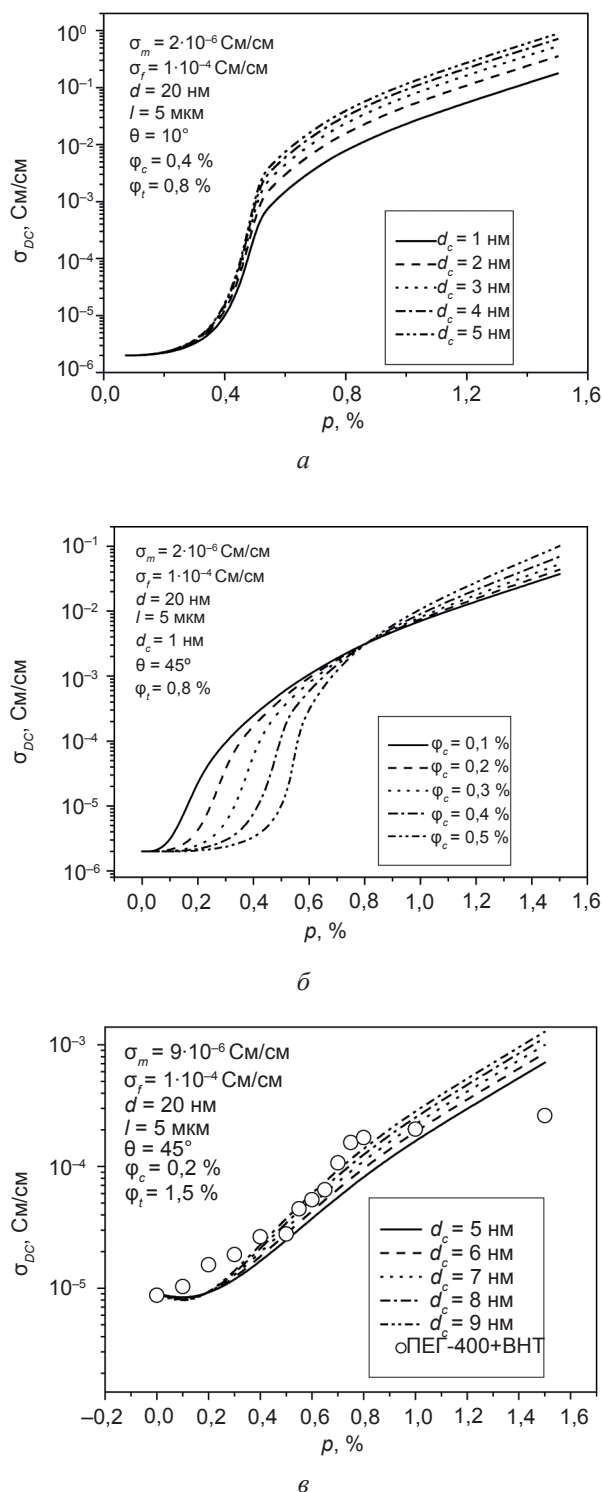


Рис. 3. Загальний вигляд функції моделі контактуючих волокон рівн. (5) (а, б) та промодельовані за допомогою рівн. (5) експериментальні дані для нанопоповнених систем на основі ПЕГ-400 (в). Лінії — модель контактуючих волокон

електропровідністю. За умови високого стрибка електропровідності при досягненні системою порогу перколяції за допомогою даної моделі можна дуже точно описати експериментальні дані.

Найбільш коректно експериментальні результати електропровідності систем поліетер-ВНТ описує модель Фур'є (рис. 4). Проте, для підгонки функції (10), значення параметрів σ_f та σ_m були значно нижчими у порівнянні з власними електропровідностями ВНТ та поліетерної матриці. Це значно знижує точність моделі і обмежує її застосування. Така невідповідність пояснюється невеликим стрибком електропровідності при проходженні порогу

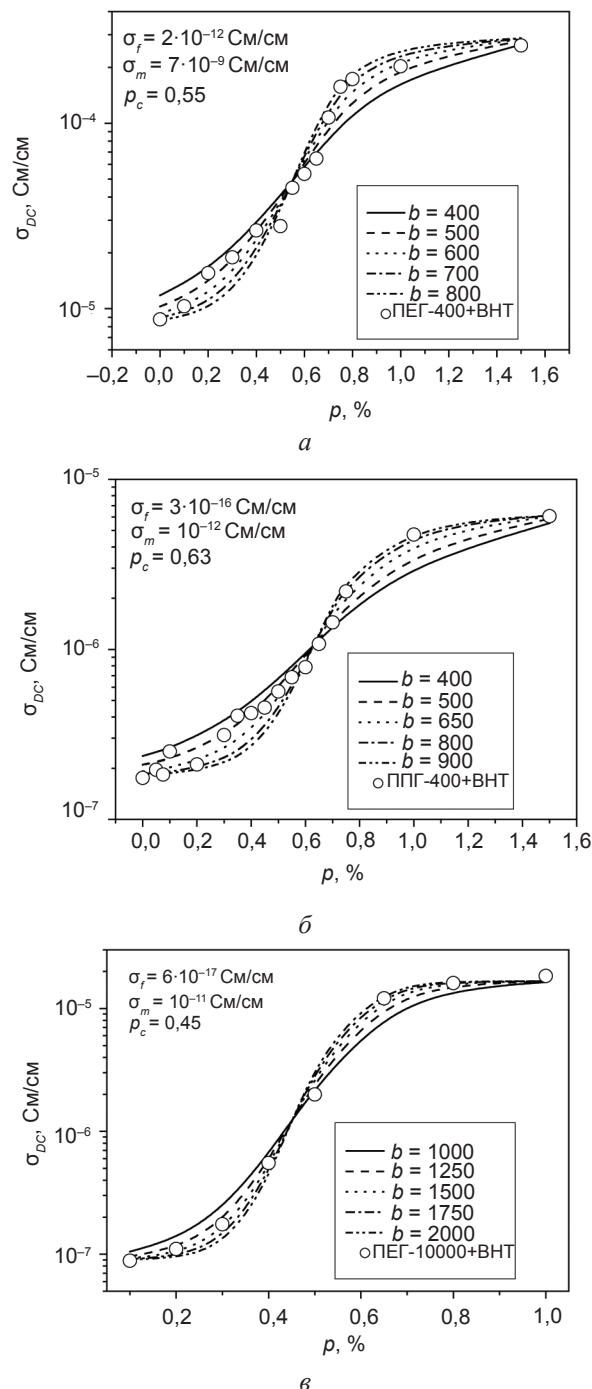


Рис. 4. Промодельовані за допомогою рівн. (10) експериментальні дані для нанопоповнених систем на основі ПЕГ-400 (а), ППГ-400 (б), ПЕГ-10000 (в). Лінії — модель Фур'є

перколяції у системах поліетер-ВНТ. Автори даної моделі описували результати електропровідності, для систем, у яких спостерігався стрибок електропровідності рівний 10–11 порядкам [16].

ВИСНОВКИ

В результаті проведеної роботи було проаналізовано основні теоретичні моделі електропровідності полімерних наноккомпозитів та їх застосування для опису експериментальних даних на прикладі модельних систем на основі поліетерів та ВНТ. Встановлено, що модифікована теоретична модель Рагамана-Чакі-Хастгіра, хоч і враховує певний морфологічний фактор, не враховує існування порогу перколяції та не може коректно описати експериментальні дані електропровідності полімерних наноккомпозитів у широкому діапазоні концентрацій наповнювача. Показано, що модель перколяції з тунелюванням може використовуватися лише для систем, які містять частинки сферичної форми та добре описує експериментальні дані лише в області концентрацій більших за поріг перколяції. Виявлено, що модель контактуючих волокон враховує велику кількість структурних параметрів наповнювача (взаємодію, ступінь розподілу, орієнтацію тощо), проте не може адекватно описати експеримент для систем, на основі полімерних матриць з високою власною електропровідністю. Тому, дану модель можна використовувати для опису систем на основі полімерів з надзвичайно низькою власною електропровідністю. Встановлено, що модель Фур'є найбільш коректно експериментальні результати електропровідності для нанонаповнених полімерних систем. Проте, вона також має свої обмеження пов'язані з величиною стрибка електропровідності при досягненні порогу перколяції.

Аналіз теоретичних моделей електропровідності показав, що не існує єдиної моделі, яка б враховувала структурні особливості матриці та наповнювача та точно описувала експериментальні результати перколяційної поведінки електропровідності у полімерних наноккомпозитах. Отже, створення універсальної моделі дозволить прогнозувати функціональні властивості полімерних наноккомпозитних матеріалів, наповнених ВНТ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Gay D., Hoa S. V., Tsai S. W. Composite materials: design and applications. — Boca Raton: «CRC Press», 2002. — 568 p.
2. Ajayan P. M., Schadler L. S., Braun P. V. Nanocomposite Science and Technology. — Weinheim: «Wiley-VCH», 2003. — 230 p.
3. Swain S. K., Jena I. Polymer / Carbon Nanotube Nanocomposites: A Novel Material // Asian J. of Chem. — 2010. — Vol. 22, No. 1. — P. 1–15.
4. Min C., Shen X., Shi Z., Chen L., Xu Z. The Electrical Properties and Conducting Mechanisms of Carbon Nanotube/Polymer Nanocomposites: A Review // Polym. -Plast. Tech. and Engin. — 2010. — Vol. 49. — P. 1172–1181.
5. Zeng X., Xu X., Shenai P. M., Kovalev E., Baudot C., Mathews N., Zhao Y. Characteristics of the Electrical Percolation in Carbon Nanotubes / Polymer Nanocomposites // J. Phys. Chem. C. — 2011. — Vol. 115, No. 44. — P. 21685–21690.
6. Huang Y. Y., Terentjev E. M. Dispersion of carbon nanotubes: mixing, sonication, stabilization, and composite properties // Polymers. — 2012. — Vol. 4. — P. 275–295.
7. Bueche F. Electrical resistivity of conducting particles in an insulating matrix // J. Appl. Phys. — 1972. — Vol. 43. — P. 4837–4838.
8. Scarisbrick R. M. Electrically conducting mixtures // J. Phys. D Appl. Phys. — 1973. — Vol. 6. — P. 2098–2110.
9. Rahaman M., Chaki T. K., Khastgir D. Modeling of DC conductivity for ethylene vinyl acetate (EVA)/Polyaniline conductive composites prepared through in-situ polymerization of aniline in EVA matrix // Compos. Sci. Technol. — 2012. — Vol. 72. — P. 1575–1580.
10. Mao C., Zhu Y., Jiang W. Design of electrical conductive composites: tuning the morphology to improve the electrical properties of graphene filled immiscible polymer blends. // ACS Appl. Mater. Interfaces. — 2012. — Vol. 4, No 10. — P. 5281–5286.
11. L. -J. Zhu, W. -Z. Cai, B. -Q. Gu, S. -T. Tu. Tunneling percolation model of the electrical conductivity of particulate nanocomposites // Mod. Phys. Lett. B. — 2009. — Vol. 23, No 10. — P. 1273–1279.

12. Lee S. B., Torquato S. Pair connectedness and mean cluster size for continuum percolation models: Computer simulation results // *J. Chem. Phys.* — 1988. — Vol. 89. — P. 6427–6433.
 13. Weber K., Kamal M. R. Estimation of the volume resistivity of electrically conductive composites // *Polym. Compos.* — 1997. — Vol. 18. — P. 711–725.
 14. Taipalus R., Harmina T., Zhang M. Q., Friedrich K. The electrical conductivity of carbon-fibre-reinforced polypropylene/polyaniline complex blends: experimental characterisation and modelling // *Compos. Sci. Tech.* — 2001. — Vol. 61. — P. 801–814.
 15. Wang S. F., Ogale A. A. Simulation of percolation behavior of anisotropic short-fiber composites with a continuum model and non-cubic control geometry // *Compos. Sci. Tech.* — 1993. — Vol. 46, No. 4. — P. 389–398.
 16. Fourier J., Boiteux G., Seytre G., Marichy G. Percolation Network of Polypyrrole in Conducting Polymer Composites // *Synth. Met.* — 1997. — Vol. 84. — P. 839–840.
 17. Лисенков Е. А., Клепко В. В. Особливості переносу зарядів у системі поліетиленгліколь / вуглецеві нанотрубки // *Журнал нано- та електронної фізики.* — 2013. — Т. 5, № 3. — С. 03052-1–03052-6.
 18. Lysenkov E. A., Yakovlev Y. V., Klepko V. V. Percolative properties of systems based on polypropylene glycol and carbon nanotubes // *Ukr. Phys. J.* — 2013. — Vol. 58, № 4. — P. 378–384.
 19. Лисенков Е. А., Клепко В. В., Яковлев Ю. В. Вплив особливостей полімерної матриці на перколяційну поведінку наноккомпозитів поліетер-вуглецеві нанотрубки // *Нано-структурне матеріалознавство.* — 2013. — № 3–4. — С. 46–54.
 20. Ram R., Rahaman M., Khastgir D. Electrical properties of polyvinylidene fluoride (PVDF)/ multi-walled carbon nanotube (MWCNT) semi-transparent composites: Modelling of DC conductivity // *Compos.: Part A.* — 2015. — Vol. 69. — P. 30–39.
 21. Lisetski L. N., Fedoryako A. P., Samoilov A. N., Minenko S. S., Soskin M. S., Lebovka N. I. Optical transmission of nematic liquid crystal 5CB doped by single-walled and multi-walled carbon nanotubes // *Eur. Phys. J. E.* — 2014. — Vol. 37. — P. 68-1–68-7.
- ## LITERATURA
1. Gay D., Hoa S. V., Tsai S. W. Composite materials: design and applications. — Boca Raton: «CRC Press», 2002. — 568 p.
 2. Ajayan P. M., Schadler L. S., Braun P. V. Nanocomposite Science and Technology. — Weinheim: «Wiley-VCH», 2003. — 230 p.
 3. Swain S. K., Jena I. Polymer / Carbon Nanotube Nanocomposites: A Novel Material // *Asian J. of Chem.* — 2010. — Vol. 22, No. 1. — P. 1–15.
 4. Min C., Shen X., Shi Z., Chen L., Xu Z. The Electrical Properties and Conducting Mechanisms of Carbon Nanotube/Polymer Nanocomposites: A Review // *Polym. -Plast. Tech. and Engin.* — 2010. — Vol. 49. — P. 1172–1181.
 5. Zeng X., Xu X., Shenai P. M., Kovalev E., Baudot C., Mathews N., Zhao Y. Characteristics of the Electrical Percolation in Carbon Nanotubes / Polymer Nanocomposites // *J. Phys. Chem. C.* — 2011. — Vol. 115, No. 44. — P. 21685–21690.
 6. Huang Y. Y., Terentjev E. M. Dispersion of carbon nanotubes: mixing, sonication, stabilization, and composite properties // *Polymers.* — 2012. — Vol. 4. — P. 275–295.
 7. Bueche F. Electrical resistivity of conducting particles in an insulating matrix // *J. Appl. Phys.* — 1972. — Vol. 43. — P. 4837–4838.
 8. Scarisbrick R. M. Electrically conducting mixtures // *J. Phys. D Appl. Phys.* — 1973. — Vol. 6. — P. 2098–2110.
 9. Rahaman M., Chaki T. K., Khastgir D. Modeling of DC conductivity for ethylene vinyl acetate (EVA) / Polyaniline conductive composites prepared through in-situ polymerization of aniline in EVA matrix // *Compos. Sci. Technol.* — 2012. — Vol. 72. — P. 1575–1580.
 10. Mao C., Zhu Y., Jiang W. Design of electrical conductive composites: tuning the morphology to improve the electrical properties of graphene filled immiscible polymer blends. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* — 2012. — Vol. 4, No. 10. — P. 5281–5286.
 11. L. -J. Zhu, W. -Z. Cai, B. -Q. Gu, S. -T. Tu. Tunneling percolation model of the electrical conductivity of particulate nanocomposites // *Mod. Phys. Lett. B.* — 2009. — Vol. 23, No. 10. — P. 1273–1279.
 12. Lee S.B., Torquato S. Pair connectedness and mean cluster size for continuum percolation

- models: Computer simulation results // *J. Chem. Phys.* — 1988. — Vol. 89. — P. 6427–6433.
13. Weber K., Kamal M. R. Estimation of the volume resistivity of electrically conductive composites // *Polym. Compos.* — 1997. — Vol. 18. — P. 711–725.
 14. Taipalus R., Harmina T., Zhang M. Q., Friedrich K. The electrical conductivity of carbon-fibre-reinforced polypropylene / polyaniline complex blends: experimental characterisation and modelling // *Compos. Sci. Tech.* — 2001. — Vol. 61. — P. 801–814.
 15. Wang S. F., Ogale A. A. Simulation of percolation behavior of anisotropic short-fiber composites with a continuum model and non-cubic control geometry // *Compos. Sci. Tech.* — 1993. — Vol. 46, No. 4. — P. 389–398.
 16. Fourier J., Boiteux G., Seytre G., Marichy G. Percolation Network of Polypyrrole in Conducting Polymer Composites // *Synth. Met.* — 1997. — Vol. 84. — P. 839–840.
 17. Lisenkov E. A., Klepko V. V. Osoblivosti perenosu zaryadiv u sistemi polietilenglikol' / vuglecevi nanotrubki // *Zhurnal nano- ta elektronnoï fiziki.* — 2013. — Vol. 5, No. 3. — P. 03052-1–03052-6.
 18. Lysenkov E. A., Yakovlev Y. V., Klepko V. V. Percolative properties of systems based on polypropylene glycol and carbon nanotubes // *Ukr. Phys. J.* — 2013. — Vol. 58, No.4. — P. 378–384.
 19. Lisenkov E. A., Klepko V. V., Yakovlev Yu. V. Vpliv osoblivostej polimernoï matrici na perkolyacijnu povedinku nanokompozitiv polieter-vuglecevi nanotrubki // *Nanostrukturne materialoznavstvo.* — 2013. — No. 3–4. — P. 46–54.
 20. Ram R., Rahaman M., Khastgir D. Electrical properties of polyvinylidene fluoride (PVDF) /multi-walled carbon nanotube (MWCNT) semi-transparent composites: Modelling of DC conductivity // *Compos.: Part A.* — 2015. — Vol. 69. — P. 30–39.
 21. Lisetski L. N., Fedoryako A. P., Samoilov A. N., Mینenko S. S., Soskin M. S., Lebovka N. I. Optical transmission of nematic liquid crystal 5CB doped by single-walled and multi-walled carbon nanotubes // *Eur. Phys. J. E.* — 2014. — Vol. 37. — P. 68-1–68-7.

СТРУКТУРА, ФАЗОВИЙ СОСТАВ И МОДЕЛЬ РОСТА АМОΡФНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ЗЕРКАЛ W-Si, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Ю. П. Першин, А. Ю. Девизенко, В. В. Мамон, В. С. Чумак, В. В. Кондратенко
*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
Харьков, Украина*

Поступила в редакцию 15.12.2015

Методами рентгеновской дифрактометрии и рентгеновской рефлектометрии ($\lambda = 0,154$ нм) исследованы структура и фазовый состав многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) W/Si, изготовленных методом прямого магнетронного распыления. Показано, что в результате взаимодействия компонентов в многослойной системе на межфазных границах формируются асимметричные силицидные прослойки как по составу, так и по толщине. Сделаны оценки плотности каждого из слоев МРЗ W/Si. Предложена модель строения аморфных МРЗ W/Si.

Ключевые слова: многослойное рентгеновское зеркало, аморфное покрытие, перемешивание, плотность, состав.

СТРУКТУРА, ФАЗОВИЙ СКЛАД ТА МОДЕЛЬ РОСТУ АМОΡФНИХ БАГАТОШАРОВИХ РЕНТГЕНІВСЬКИХ ДЗЕРКАЛ W-Si, ВИГОТОВЛЕНИХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РОЗПИЛУ

Ю. П. Першин, А. Ю. Девизенко, В. В. Мамон, В. С. Чумак, В. В. Кондратенко
Методами рентгенівської дифрактометрії та рентгенівської рефлектометрії ($\lambda = 0,154$ нм) досліджені структура та фазовий склад багатослоєвих рентгенівських дзеркал (БРД) W/Si, виготовлених методом магнетронного розпилення. Встановлено, що в результаті взаємодії компонентів у багатослоєвій системі на міжфазних межах формуються асиметричні силицидні прошарки неоднакового складу та товщини. Зроблена оцінка густини кожного шару БРД W/Si. Запропонована модель будови БРД W/Si.

Ключові слова: багатослоєве рентгенівське дзеркало, аморфне покриття, перемішування, густина, склад.

STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND GROWTH MODEL OF AMORPHOUS W/Si MULTILAYER X-RAY MIRRORS DEPOSITED BY MAGNETRON SPUTTERING

Yu. P. Pershyn, A. Yu. Devizenko, V. V. Mamon, V. S. Chumak, V. V. Kondratenko
By methods of X-ray diffractometry and reflectometry ($\lambda = 0.154$ nm) the structure and phase composition of W/Si multilayer X-ray mirrors (MXMs) deposited with DC magnetron sputtering are studied. It is shown that as a result of component interaction during the deposition process asymmetric silicide interlayers are formed at interfaces of multilayer system. The adjacent interlayers within the MXM period differ both by composition and thickness. The densities of each layer are estimated. Model of W/Si MXM construction is proposed.

Keywords: multilayer X-ray mirror, amorphous coating, intermixing, density, composition.

1. ВВЕДЕНИЕ

Многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ) на основе W/Si нашли широкое применение в различных областях науки и техники (материаловедение, медицина, биология и др.), благодаря высокой эффективности ($R \sim 5-70$ %) в широком диапазоне длин волн ($0,01 < \lambda < 3,1$ нм). Их предельные оптические характеристики ограничиваются

различными дефектами (пониженная плотность слоев, наличие в слоях газов остаточной атмосферы или нежелательных примесей, межфазные шероховатости, наличие перемешанных прослоек на межфазных границах, ошибки в толщинах слоев, окисление поверхностных слоев и др.), наследуемыми индивидуальными особенностями роста составляющих их пленок. Среди

этих дефектов главную роль в снижении эффективности зеркал играют межфазные дефекты: шероховатости и перемешивание.

Основными методами исследования межфазных дефектов являются методы просвечивающей электронной микроскопии поперечных срезов и рентгеновская дифракция: микроскопия дает качественную картину строения МРЗ, а рентгеновские методы — количественно дополняют ее.

Трудность, с которой приходится сталкиваться при исследовании МРЗ W/Si, состоит в том, что практически применяемые зеркала должны иметь небольшой период ($d < 6$ нм), и тонкие слои, составляющие МРЗ, аморфны. Обычно масштабы межфазного перемешивания хорошо видны на электронно-микроскопических (ЭМ) снимках поперечных срезов для кристаллических слоев за счет дифракционного контраста между отдельными кристаллитами (они, как правило, заметно темнее либо светлее) и серыми аморфными прослойками с однородным контрастом на фоне светлых слоев аморфного кремния. Эти прослойки легко выявляются на поперечных срезах МРЗ Sc/Si [1], Mo/Si [2] и W/Si [3] с большими периодами, где металлические слои имеют поликристаллическую структуру. В аморфных зеркалах их выявить очень трудно. Особенно это относится к МРЗ W/Si, поскольку слои вольфрама и перемешанных прослоек имеют достаточно высокое поглощение для электронов. В результате прослойки и слои вольфрама имеют близкий контраст и поэтому неразличимы на ЭМ-изображениях. Для оценки перемешивания в многослойной системе W-Si берут видимые на ЭМ-снимках величины прослоек, определяемые как «резкость» межфазных границ. Поэтому в литературе даются разные оценочные толщины для перемешанных прослоек. Так D. L. Windt и др. [3] сообщает о межфазных прослойках толщиной 0,58–1,08 нм; W. C. Shih и др. [4] с применением метода Френеля при обработке электронно-микроскопических изображений поперечных срезов делает оценку толщины прослоек 1,15–1,4 нм; а A. K. Petford-Long и др. [5] указывает на аморфные прослойки, состоящие из W

и Si, толщиной $1,3 \pm 0,4$ нм. Однако, даже если допустить, что измерения сделаны правильно, как сообщают сами авторы [4], такие измерения несут в себе информацию одновременно о перемешивании и шероховатости, разделение которых представляет отдельную задачу, решить которую не просто.

Поскольку сделать точную оценку величины перемешанных прослоек затруднительно, используют косвенные методы определения этого параметра, например подгонку малоугловых кривых отражения рентгеновских лучей (главным образом в жесткой области спектра на длине волны $\lambda = 0,154$ нм). Из-за большого числа подгоночных параметров (минимум 4 для каждого слоя: толщина, плотность, шероховатость и состав) иногда теоретические кривые подгоняются лучше для случая, когда перемешанные прослойки «отсутствуют» [3]. Однако это противоречит электронно-микроскопическим данным поперечных срезов [3], на которых наблюдаются прослойки для МРЗ W/Si с кристаллическими слоями вольфрама на границе осаждения атомов вольфрама на слой кремния; а эта прослойка формируется до начала кристаллизации слоя вольфрама, т.е. должна образовываться обязательно.

Открытым также остается вопрос состава прослоек: это механическая смесь или аморфный силицид? Если силицид, то какого состава? W. C. Shih и др. [4] просто говорят о межфазном перемешивании слоев W и Si, опуская этот вопрос из рассмотрения. M. J. H. Kessels и др. [6] отмечают, что слои вольфрама образуют смесь со слоями кремния, в противоположность системе Mo/Si, где на межфазных границах формируется соединение. В литературе указывается на возможность химического взаимодействия соседних слоев с образованием аморфного силицида и даются различные варианты состава аморфного силицида: от WSi_2 до WSi в зависимости от величины периода [7]; либо просто указывают на возможность формирования слоистой композиции W_xSi_y/Si для малопериодных МРЗ [3].

В данной работе мы сделали попытку измерить степень межфазного

перемешивания в многослойной системе W-Si, оценить толщины перемешанных прослоек и их состав, а также построить модель роста аморфных МРЗ W/Si. Для этого мы использовали данные рентгеновских измерений ($\lambda = 0,154$ нм), которые, с одной стороны, позволяют получить количественную информацию об объекте исследования, а с другой — существенно уменьшить число вариантов обсуждения полученных данных.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Многослойные зеркала изготавливали методом прямого магнетронного распыления. В течение каждого эксперимента токи на обоих магнетронах и давление аргона (2,7 мТорр) поддерживалось постоянным, что обеспечивало постоянство скоростей осаждения. Скорости осаждения для вольфрама и кремния составляли $\sim 0,15$ и $\sim 0,4$ м/с.

Расстояние от поверхности магнетронов до подложки составляло ~ 30 мм. Многослойные покрытия осаждали на подложки из кремния и сверхгладкого стекла с шероховатостью поверхности 0,3–0,5 нм. В процессе изготовления каждый слой был осажден так, что подложка находилась над каждым из магнетронов фиксированное время. Времена выдержки подложки над каждым из магнетронов в процессе изготовления одного зеркала были одинаковы, поэтому номинальные соотношения толщин слоев в периоде для образцов, изготовленных в разных экспериментах, были также одинаковыми в пределах воспроизведения экспериментальных условий осаждения слоев каждого компонента.

В качестве мишеней использовались пластины вольфрама и кремния диаметром ~ 100 мм и чистотой 99,5 % и 99,99 %, соответственно. Мишень кремния представляла собой монокристаллическую шайбу (111)Si.

Вакуумная камера подвергалась принудительному прогреву перед нанесением слоев, и после остывания до комнатной температуры давление остаточных газов составляло в ней не более 3×10^{-6} Торр (1 Торр = 133,322 Па).

Многослойные образцы аттестовались на малоугловом рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М, собранном по схеме двойного кристалла-спектрометра с монокристаллом (110)Si в качестве монохроматора. В сочетании со щелью шириной 0,1 мм это позволяло выделять только $\text{CuK}\alpha_1$ линию ($\lambda = 0,154$ нм) из спектра, создаваемого рентгеновской трубкой с медным анодом. Фазовый состав образцов контролировался на другом дифрактометре, содержащем графитовый анализатор, в излучении $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0,154178$ нм).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы изготовили серию многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) W/Si, состоящую из 17 образцов. Время выдержки подложки над каждым из магнетронов изменялось в пределах от 1,8 до 12,0 секунд для разных образцов; при этом величины периодов изготовленных таким образом образцов изменялись в пределах от ~ 1 до ~ 6 нм. Число периодов выбиралось таким образом, чтобы общая толщина многослойного покрытия для всех образцов была приблизительно одинакова и составляла ~ 200 нм. Такие относительно тонкие образцы изготавливались, чтобы минимизировать влияние эрозии мишеней на дрейф скорости осаждения при изготовлении серии. С другой стороны, они были достаточно «толстыми», чтобы иметь отражающие способности, близкие к используемым практически. Соотношение слоев подбиралось экспериментальным путем таким образом, чтобы получить высокие коэффициенты отражения в мягкой рентгеновской области (главным образом на длине волны O-K α , $\lambda = 2,36$ нм) для многослойных образцов с периодами $d \sim 3$ нм.

3.1. Фазовый состав МРЗ W/Si

Чтобы установить фазовый состав МРЗ W/Si, мы сделали рентгеновские съемки образцов на больших углах ($2\theta = 15\text{--}130^\circ$) в излучении Cu-K α . Пример дифрактограммы с наибольшим периодом ($\sim 6,3$ нм) представлены на рис. 1. На дифрактограмме наблюдается 3 явных максимума: 1) в районе 29° , т. е. вблизи интенсивной линии (111)

Si; 2) в районе 40° , т. е. вблизи интенсивной линии (110)W; это самый интенсивный максимум на дифрактограмме, мы его будем называть основным; и 3) в районе 69° , где можно ожидать рефлексы как от кремния, так и от вольфрама и его силицидов. Исходя из того, что общая толщина слоев вольфрама в образцах составляет минимум 56 нм, такая невысокая интенсивность максимумов, их относительно большая ширина ($2\Delta\theta > 5,5^\circ$), а также небольшое количество максимумов свидетельствует о том, что все слои находятся в аморфном состоянии либо в состоянии, близком к аморфному.

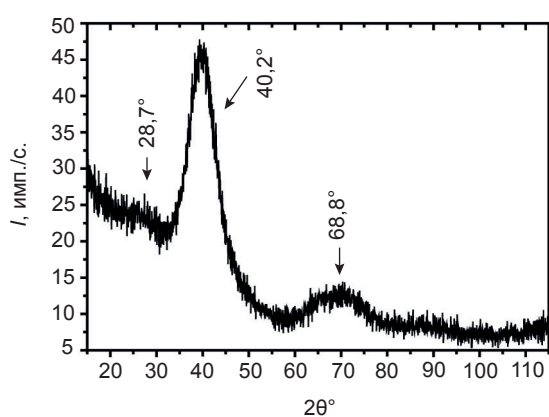


Рис. 1. Фазовая дифрактограмма МРЗ W/Si с периодом $d \sim 6,3$ нм, полученная в скользящей геометрии ($\theta = 0,7^\circ$ фиксирован) в излучении CuK α ($\lambda = 0,154178$ нм)

Мы проследили динамику изменения углового положения основного максимума (вблизи 40°) как функция величины периода МРЗ. В этой области углов могут находиться наиболее интенсивные линии вольфрама и его силицидов. На рис. 2 представлена такая зависимость [$2\theta = f(d)$]. Наиболее интенсивные линии веществ, которые могут образовываться в МРЗ W/Si при осаждении, находятся на углах $40,246^\circ$ (W); $42,648^\circ$ (WSi_2) и $42,86^\circ$ (W_5Si_3). Поэтому смещение основного пика от $\sim 40^\circ$ к $\sim 42^\circ$ с уменьшением периода, наблюдаемое на рис. 2, мы связываем с тем, что образцы с тонкими слоями вольфрама становятся более силицидными. Отметим здесь также, что максимумы в области углов $\sim 40^\circ$ и $\sim 69^\circ$ смещаются в разные стороны с изменением периода, т. е. большеугловые максимумы не являются вторыми порядками по отношению

к основным. Это также говорит в пользу аморфности МРЗ.

Угловые положения основных максимумов для образцов с тремя самыми тонкими слоями вольфрама меняются мало, т.е. W-содержащие слои в них подобны по фазовому составу. Однако их угловое положение заметно меньше приведенных выше табличных значений углов для силицидов. Это указывает либо на то, что в образовавшихся силицидных слоях среднее межатомное расстояние немного больше табличного (т. е. плотность слоев меньше табличной); либо, что реакция силицидообразования между слоями W и Si идет не полностью.

Следует отметить, что для МРЗ с $d > 2$ нм (рис. 2) с ростом периода основной пик смещается только в сторону углового положения наиболее интенсивной линии для массивного вольфрама ($40,246^\circ$). Поэтому мы полагаем, что если в изготовленных зеркалах и присутствует силицид одного типа (например, WSi_2), то в этих МРЗ маловероятно появление другого силицида (например, W_5Si_3). В случае же присутствия обоих силицидов, можно определенно сказать, что их относительная доля с ростом толщины вольфрама только падает.

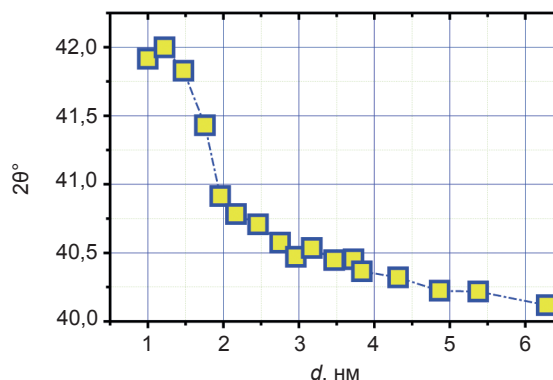


Рис. 2. Угловое положение наиболее интенсивного максимума на фазовой дифрактограмме для различных МРЗ W/Si в зависимости от периода

3.2. Малоугловые рентгеновские съемки ($\lambda = 0,154$ нм)

Изготовленные МРЗ были также отсняты в жестком рентгеновском излучении ($\lambda = 0,154$ нм) при малых углах ($2\theta < 13^\circ$). По картинкам малоугловой дифракции (рефлектограммам) были измерены периоды, коэффициенты отражения всех дифракционных максимумов

и критические углы полного внешнего отражения. Примеры четырех рефлектограмм приведены на рис. 3. Здесь представлены рефлектограммы образцов с наименьшим ($d \sim 1$ нм), наибольшим (6,282 нм) периодами, а также для двух промежуточных образцов. Для образца с наименьшим периодом ($d \sim 1$ нм) наблюдается только один порядок отражения. Для остальных образцов ($d \geq 1,2$ нм) — минимум 2. Для всех образцов между главными максимумами присутствуют также и промежуточные максимумы, что указывает на их достаточно хорошую периодичность.

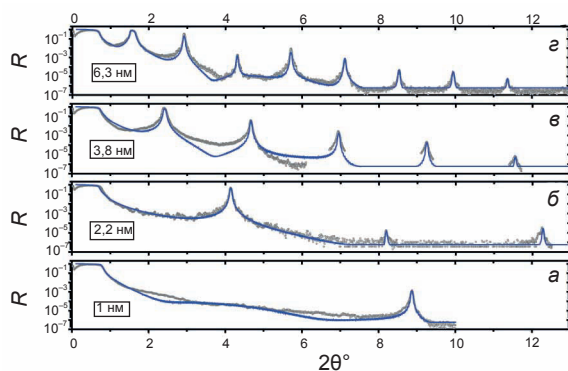


Рис. 3. Малоугловые рефлектограммы ($\lambda = 0,154$ нм) многослойных рентгеновских зеркал W/Si (кружочки) с периодами 1 нм; 2,167 нм; 3,836 нм и 6,282 нм. Сплошными линиями показаны подгоночные кривые к ним, демонстрирующие степень совпадения расчетов с экспериментом

На рефлектограммах некоторых образцов (рис. 3) наблюдается «погасание» отдельных порядков отражения, т. е. один из последующих порядков отражения интенсивнее предыдущего. Так для многослойного образца с $d \sim 2,2$ нм (рис. 1б) «гаснет» 2-й максимум ($R_3/R_2 \sim 2$), а для образца с $d \sim 6,3$ нм (рис. 1г) — 3-й максимум ($R_4/R_3 \sim 5$). Погасание указывает на то, что в этих образцах доля сильнопоглощающего слоя в периоде близка к 0,5 и 0,33, соответственно. Это также свидетельствует, что соотношение толщин слоев в периоде меняется с периодом. Такое изменение для образцов с различными периодами может свидетельствовать либо о фазообразовании в системе W-Si, сопровождающееся объемными усадками, либо об изменении соотношения толщин слоев в процессе осаждения за счет, например,

перераспыления осажденного вещества уже с подложки [7].

3.3. Оценка времени подхода/ухода

Прежде, чем проводить анализ данных, полученных из малоугловых рефлектограмм, была сделана оценка времени подхода/ухода ($\tau_{п/у}$). Необходимость введения этого параметра вызвана тем, что в процессе нанесения каждого слоя помимо контролируемой толщины, определяемой фиксированным временем остановки подложки над магнетроном, всегда существует небольшая добавка к толщине слоя, связанная с осаждением вещества в процессе движения подложки над магнетроном при смене осаждаемого слоя. Это время мы определяем как отношение толщины нанесенного покрытия во время движения подложки над магнетронами к скорости осаждения в центре магнетрона, когда подложка не движется. Это время не зависит от скорости осаждения вещества из конкретного источника, поскольку толщина осаждаемого покрытия пропорциональна скорости роста. Оно должно зависеть только от распределения потока вещества над магнетронами и линейной скорости движения подложки, которые при изготовлении серии не менялись.

Прежде всего для каждого образца мы измерили интенсивности линии $L\alpha$ -W, возбуждаемой рентгеновской трубкой с серебряным анодом. Затем мы поделили величину измеренной таким образом интенсивности на число периодов для соответствующего образца, чтобы определить интенсивность, приходящуюся на слой вольфрама в одном периоде, и построили зависимость этого сигнала от фиксированного времени выдержки (без учета подхода/ухода) над магнетронами (рис. 4). Обращаем внимание, что на рис. 4 ось X обозначена, как фиксированное время выдержки для вольфрама (τ_w), которое, как было указано выше, совпадает со временем выдержки кремния (τ_{Si}). Поскольку выполненные здесь измерения фактически относятся к вольфраму, мы использовали такое обозначение оси X . В дальнейшем мы также будем использовать подобное обозначение в уместных случаях,

хотя с соответствующими разъяснениями можно использовать просто фиксированное время выдержки.

Как видно из рисунка, через экспериментальные точки можно провести прямую, что указывает на постоянство скорости осаждения вольфрама. Прямая не пересекает начало координат, поскольку при построении графика фактически не учитывалось, что происходило напыление слоя вольфрама во время подхода к и ухода подложки от магнетрона, т. е. все экспериментальные точки сдвинуты влево от их истинных положений на время подхода/ухода ($\tau_{п/у}$). Искомое значение времени подхода/ухода можно получить, найдя точку пересечения аппроксимирующей прямой с осью X , а именно: $\tau_{п/у} = 0,76 \pm 0,03$ с. Хотя при оценке $\tau_{п/у}$ мы не использовали скорости осаждения вольфрама, полученное значение соответствует времени подхода/ухода, согласно определению, данному выше, поскольку, с одной стороны, интенсивность сигнала должна быть пропорциональна количеству осаждаемого вещества, т. е. его толщине, а с другой стороны, при такой аппроксимации дополнительное количество вольфрама, осаждаемое во время движения подложки, учитывается автоматически, но выражается в других единицах измерения. Добавив время полхода/ухода к фиксированному времени выдержки, мы получили «общее» время нанесения покрытия для каждого образца.

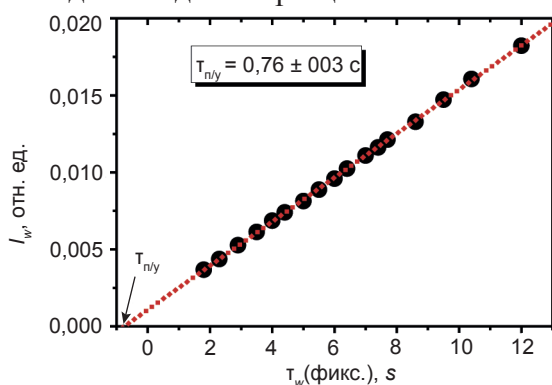


Рис. 4. Нормированная интенсивность линии $L\alpha$ -W (относительные единицы) в зависимости от фиксированного времени осаждения вольфрама для различных МРЗ W/Si. Пересечение прямой, проходящей через экспериментальные точки, с осью X дает время подхода/ухода, $\tau_{п/у}$ (см. текст)

Применение этой методики дает минимальную погрешность, поскольку

химический состав всех образцов был одинаков, что обеспечивалось постоянным соотношением толщин слоев.

3.4. Определение скоростей осаждения компонентов

На рис. 5 мы построили экспериментальную зависимость периода (кружочки) для всех МРЗ от общего времени нанесения (с учетом времени подхода/ухода). По тангенсу угла наклона можно судить о совместной скорости осаждения (D_{W+Si}) слоев W и Si. Анализ этой зависимости показывает, что наблюдается значительное изменение скорости осаждения при переходе от малых к большим временам осаждения. Прямые, проведенные через первые и последние пять точек, где скорость осаждения меняется мало ($\sim 1\%$), дают значения $0,438 \pm 0,005$ и $0,572 \pm 0,005$ нм/с, соответственно. Хотя скорости, полученные по первым пяти точкам, имеют достаточно малую погрешность, строго говоря, мы должны проводить аппроксимирующую прямую только через первые три точки, поскольку, как показано в подразделе 3.1, фазовый состав вольфрамовых слоев близок только у трех образцов с малыми периодами (рис. 2). Совместная скорость осаждения, определенная по первым трем точкам, составляет $0,428 \pm 0,007$ нм/с. Эта величина немного меньше полученной выше, и погрешность определения немного больше. Сравнивая скорости осаждения, полученные для крайних участков на рис. 5, можно сделать выводы, что значения скоростей отличаются, по меньшей мере, на 25 %.

Известно, что в системе W-Si возможно образование трех силицидов: WSi_2 , W_5Si_3 и W_3Si с табличными плотностями $9,857$ г/см³, $14,523$ г/см³ и $16,2$ г/см³, соответственно. Хотя справочные данные по последнему силициду (W_3Si) приводятся в литературе [8], на равновесной диаграмме состояния W-Si [9] он отсутствует, что указывает на его возможное существование в неравновесном состоянии. Такое состояние, как указывается в [8], может быть стабилизировано примесями кислорода и азота. Ранее [10] было показано, что тонкие слои вольфрама вследствие наличия примесей также растут с неравновесной структурой (фаза β -W).

Поэтому мы оставили силицид W_3Si для рассмотрения, как один из возможных кандидатов объяснения изменения скорости осаждения.

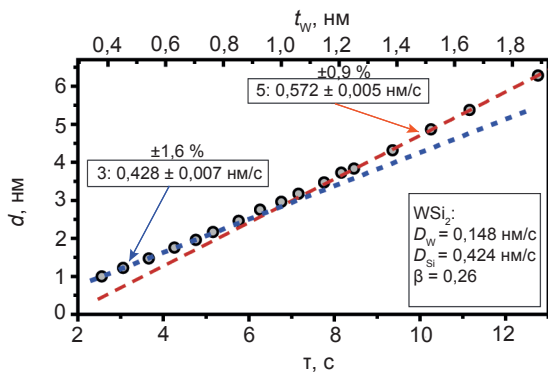


Рис. 5. Зависимость периода MPЗ W/Si от времени осаждения. Прямая, проведенная через верхние 5 точек, позволяет оценить совместную скорость осаждения обоих компонентов ($0,572 \pm 0,005$ нм/с)

Образование этих силицидов сопровождается объемной усадкой. Если полагать, что слои W и Si имеют табличные плотности ($19,263$ г/см³ и $2,332$ г/см³, соответственно), то максимальные величины усадок при образовании этих силицидов принимают значения 12% (W_3Si), $17,6\%$ (W_5Si_3) и $27,6\%$ (WSi_2). Объемная усадка должна сопровождаться уменьшением периода и соответствующим спадом видимой скорости осаждения, т. е. это взаимосвязанные параметры. Сравнивая полученные усадки с величиной изменения скорости осаждения (рис. 5), можно сделать вывод, что силицидообразование в системе W-Si может рассматриваться, как одна из причин значительного снижения скорости осаждения вещества для MPЗ с малыми периодами.

Считая, что падение скорости осаждения вызвано образованием силицида только одного типа, мы последовательно рассчитали скорости осаждения вольфрама для каждого из силицидов, полагая, что разница в скоростях осаждения на крайних участках рисунка 5 вызвана объемными изменениями, связанными с появлением конкретного силицида. Для этого мы рассчитали молярные объемы компонентов, вступающих в реакцию для образования силицида, используя табличные плотности компонентов. Например, для образования одного моля дисилицида вольфрама в реакции

силицидообразования ($W + 2Si = WSi_2$) необходимо иметь $183,85/19,263 = 9,544$ см³ вольфрама и $2 \times 28,0855/2,332 = 24,087$ см³ кремния, из которых получится $(183,85 + 2 \times 28,0855)/9,857 = 24,350$ см³ дисилицида вольфрама. Из этих вычислений видно, что данная реакция сопровождается усадкой $9,281$ см³ ($27,6\%$). Используя соотношения между этими числами, мы можем восстановить объемы каждого из компонентов реакции, имея данные хотя бы для одного из параметров реакции. Обращаем внимание, что объемы и объемные изменения в многослойной системе мы связываем только с изменениями толщин слоев или периода MPЗ, поскольку мы не ожидаем каких-либо линейных изменений в плоскости слоев, располагающихся на подложке.

Можно показать, что толщина вольфрама (t_w), участвующая в конкретном объемном изменении силицидообразующей реакции либо, другими словами, приводящая к конкретному изменению скоростей, по величине будет практически равна скорости осаждения вольфрама (D_w). Например, для силицида WSi_2 разница в полученных скоростях осаждения $0,144$ нм/с. должна соответствовать объемной доле усадки $0,276$, по которой мы можем сначала определить общую толщину W + Si, вступающих в реакцию: $0,144/0,276 \approx 0,5217$ нм; а затем, умножив на объемную долю вольфрама до образования силицида, вычислить конкретную толщину вольфрама, образующего дисилицид: $0,5217 \times 0,2838 \approx 0,148$ нм. Таким образом, мы получаем скорости осаждения вольфрама $0,148$ нм/с, $0,466$ нм/с и $0,845$ нм/с для WSi_2 , W_5Si_3 и W_3Si , соответственно. Можно заметить, что скорость осаждения вольфрама в предположении, что образуется W_3Si , превышает совместную скорость осаждения W и Si ($0,572$ нм/с.), поэтому мы опустили этот силицид из дальнейшего рассмотрения. Вычитая скорость вольфрама из совместной скорости, мы также можем оценить ожидаемые скорости осаждения кремния (D_{Si}), которые получают равными $0,424$ м/с (WSi_2) и $0,106$ нм/с (W_5Si_3). Отсюда следует, что номинальная объемная доля вольфрама в периоде должно быть $\sim 0,26$ или $\sim 0,82$ при условии, что усадка

связана с образованием WSi_2 либо W_5Si_3 , соответственно.

В подразделе 3.2 мы отмечали, что доля сильнопоглощающего слоя в периоде возрастает от $\sim 0,33$ до $\sim 0,5$ с уменьшением периода МРЗ от ~ 6 до ~ 2 нм. Однако мы можем убедиться, что такая ситуация невозможна для многослойных образцов, если образуется W_5Si_3 , поскольку силицидообразование может приводить только к росту доли W-содержащего слоя при снижении периода, а номинальная доля W в периоде, оцененная для W_5Si_3 , в исходном состоянии уже составляет $\sim 0,82$. Как можно видеть, для силицида WSi_2 тенденция изменения указанной доли с изменением периода никаких противоречий не вызывает. Таким образом, мы приходим к выводу, что, по крайней мере, для тонкого вольфрама ($\tau_w < 4$ с) дисилицид вольфрама может быть единственной фазой, образование которой объясняет падение скорости осаждения при малых периодах. На верхней оси рис. 5 мы отложили толщины вольфрама, которые мы ожидаем для изготовленных образцов, чтобы установить, что, по меньшей мере, до толщины $t_w \sim 0,54$ нм (т. е. первые три точки на рис. 2) вольфрам находится в связанном с кремнием состоянии в виде WSi_2 .

3.5. Оценка усадки в многослойной системе W-Si

Зная общее время осаждения (τ) и совместную скорость осаждения (D_{W+Si}), мы нашли усадку (Δd) для МРЗ W/Si с различными периодами, которая равна $\Delta d = D_{W+Si} \times \tau - d$, и построили полученные значения в координатах $\Delta d = f(t_w)$ на рис. 6. Из рисунка видно, что усадка растет от $\sim 0,45$ нм до ~ 1 нм с ростом толщины вольфрамового слоя. Эту зависимость условно можно разделить на 3 участка: (1-й) $t_w < 0,7$ нм, где первые 5 точек лежат примерно на одной прямой (тангенс угла наклона $0,91 \pm 0,04$); (2-й) $0,7 < t_w < 1,25$ нм, где меняется угол наклона экспериментальных точек (тангенс угла наклона $\sim 0,42 \pm 0,04$) и (3-й) $t_w > 1,25$ нм, где значения Δd меняются мало. Из табличных величин плотностей мы рассчитали ожидаемые отношения усадки к толщине вольфрама при образовании различных силицидов и получили, что для WSi_2 эта величина составляет $0,9725$, а для

W_5Si_3 — $0,3093$. Сравнивая рассчитанные величины с экспериментальными, мы можем сделать вывод, что на первом участке должен образовываться WSi_2 . В подразделе 3.1 было показано, что фазовый состав МРЗ для первых трех точек ($t_w < 0,54$ нм на рис. 6) однороден, и действительно, прямая, проведенная через них, дает $\Delta d/t_w \sim 0,97 \pm 0,04$, что практически совпадает с аналогичным теоретическим значением для WSi_2 . Величина $\Delta d/t_w$ для последних трех точек 1-го участка ($0,54 < t_w < 0,70$ нм) принимает значение $0,87 \pm 0,14$, что уже заметно ниже аналогичной величины для дисилицида. Другими словами, хотя на 1-м участке средний состав W-содержащего слоя близок к дисилициду, его состав немного меняется в сторону повышения содержания вольфрама в пределах этого участка.

На третьем участке силицидообразование достигает насыщения, и здесь можно ожидать появление в МРЗ слоя аморфного вольфрама. Что касается второго участка, то сейчас мы не можем определенно сказать произошла ли смена типа силицида ($WSi_2 \rightarrow W_5Si_3$), присутствуют ли оба силицида одновременно или вольфрам реагирует с кремнием частично, образуя, например, смесь $W + WSi_2$.

Интересно отметить, что при образовании WSi_2 объемная усадка, вызванная силицидообразованием, практически совпадает с объемом участвующего в реакции вольфрама (разница менее 3 %). Поэтому период многослойных образцов с малыми периодами ($d < 1,5$ нм) почти точно ($t_{Si}/d \sim 0,99$) соответствует толщине напыленного слоя кремния. Исходя из этого факта, мы можем сделать оценку времени подхода/ухода иначе, по формуле:

$$\tau_{п/у} = (d - t_\phi \times D_{Si})/D_{Si}$$

где d — период МРЗ W/Si, t_ϕ — фиксированное время осаждения кремния, D_{Si} — скорость осаждения кремния. Усреднение по первым 3 точкам дает $\tau_{п/у} = 0,54 \pm 0,01$ с. Сравнивая эту величину со временем подхода/ухода, полученным в подразделе 3.3 ($0,76$ с), можно видеть, что она на $\sim 0,22$ с меньше. Если мы помножим полученную разницу на скорость кремния, то получим,

что в малопериодных образцах «не хватает» $\sim 0,1$ нм кремния. Можно предположить, что это именно тот кремний, который распыляется с поверхности подложки над W-магнетроном прибывающими атомами W и нейтральными атомами Ar, отраженными от мишени W, в процессе изготовления зеркал W/Si, что описывается в [7]. Полученная величина удаленного с подложки кремния показывает масштаб происходящего события в конкретных условиях нашего эксперимента. Таким образом, мы можем ожидать, что для всех образцов в нашей серии $\sim 0,1$ нм кремния была удалена с подложки над магнетроном с вольфрамовой мишенью. Это также означает, что реальная усадка для всех образцов на $\sim 0,1$ нм меньше и, например, для 3-го участка ($t_w > 1,25$ нм, рис. 6) она составляет $\sim 0,9$ нм, а не ~ 1 нм.

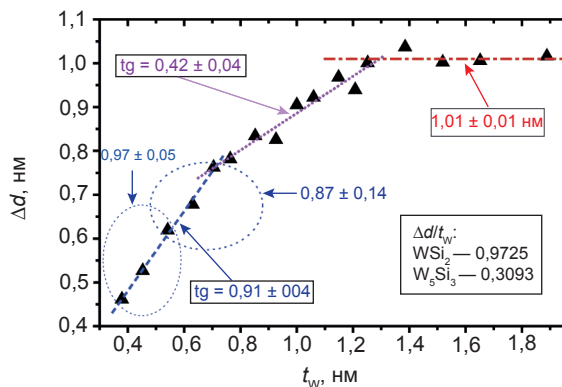


Рис. 6. Зависимость усадки (Δd) периода MP3 W/Si (треугольники) от толщины наносимого слоя вольфрама. Приведены тангенсы углов наклона для прямых, проведенных через экспериментальные точки, а также аналогичные теоретические значения, полученные на основе табличных данных для чистых компонентов и силицидов

3.6. Оценка плотности слоев

Из рефлектограмм мы также извлекли величины критических углов. Они последовательно растут от $\sim 0,69^\circ$ (по шкале 2θ) до $\sim 0,79^\circ$ с уменьшением периода (см. рис. 7). Поскольку при таких критических углах глубина проникновения рентгеновского излучения в поверхность, по меньшей мере, в 3 раза превосходит периоды изготовленных MP3, (т. е. можно считать, что происходит усреднение оптической плотности по нескольким периодам), то такое изменение свидетельствует о росте средней плотности MP3 с уменьшением периода.

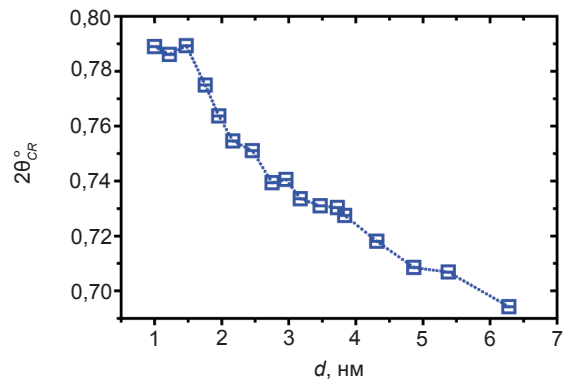


Рис. 7. Критические углы для MP3 W/Si как функция периода (d)

Критические углы для трех самых маленьких периодов примерно равны, это означает, что эти образцы имеют близкие плотности. Это также указывает на то, что в образцах с периодом $d < 1,5$ нм взаимодействие слоев W и Si достигло насыщения. Для образцов с $d > 1,5$ нм наблюдается уменьшение критического угла, т. е. средняя плотность падает, что свидетельствует о меньшей степени взаимодействия слоев. Эти данные коррелируют с данными фазового анализа, приведенными в подразделе 3.1, что подтверждает наши предварительные предположения, сделанные выше.

Мы использовали данные измерения критических углов для того, чтобы оценить плотность отдельных слоев в многослойных покрытиях. Для этого мы использовали формулу для среднего индекса ($\bar{\delta}$) показателя преломления (n) ($n = 1 - \bar{\delta}$) [11]:

$$\bar{\delta} = \frac{t_w}{d} \delta_w + \frac{t_{Si}}{d} \delta_{Si} + \frac{t_{wSi}}{d} \delta_{wSi}, \quad (1)$$

где t с субиндексами — толщины вольфрама, кремния или силицида в MP3; δ с субиндексами — индекс показателя преломления для вольфрама, кремния или силицида в MP3; d — период многослойного рентгеновского зеркала. Если выражение (1) переписать в виде:

$$\bar{\delta} \times d = t_w \delta_w + (t_{Si} \delta_{Si} + t_{wSi} \delta_{wSi}) \quad (2)$$

и построить график ($\bar{\delta} \times d$) как функция (t_w), то угол наклона такой зависимости даст δ_w , откуда можно извлечь данные о плотности, используя формулу:

$$\delta = 2,7 \times 10^{-6} \frac{\rho}{A} f_1 \lambda^2 \quad [12], \quad (3)$$

где ρ — плотность вещества, A — атомная масса (или сумма атомных масс для многокомпонентного вещества), f_1 — атомный фактор рассеяния [13] (или сумма атомных факторов рассеяния для многокомпонентного вещества), λ — длина волны рентгеновского излучения. Для построения этого графика у нас есть d и t_w ; а средний индекс ($\bar{\delta}$) показателя преломления для каждого образца мы определяем по формуле: $\bar{\delta} = \theta_{CR}^2 / 2$.

На рис. 8 представлена зависимость ($\bar{\delta} \times d$) от t_w в виде 5 экспериментальных точек для образцов, в которых в соответствии с рис. 6 (3-й участок) можно ожидать наличие вольфрама в свободном состоянии. Тангенс угла наклона для линии, проведенной через эти точки, должен нам дать индекс показателя преломления совместно для вольфрама и для кремния, поскольку в нашей серии мы меняли толщину обоих компонентов одновременно. Тогда, если переписать выражение (2) с учетом соотношения скоростей осаждения, можно получить следующее выражение:

$$\bar{\delta} \times d = t_w (\delta_w + 2,86 \times \delta_{Si}) + [t_{WSi} \delta_{WSi}], \quad (4)$$

из которого становится ясно, что тангенс угла наклона зависимости, приведенной на рис. 8 равен $\delta_w + 2,86 \times \delta_{Si}$. Известно, что кремний в аморфном состоянии имеет плотность ниже, чем в массивном, примерно на 10 % [14], т. е. $2,1 \text{ г/см}^3$. Используя эти данные для выражения (3), можно определить его индекс: $\sim 7 \times 10^{-6}$. Тогда экспериментальный индекс показателя преломления вольфрама будет равен

$$\delta_w^E = (6,1 - 2,86 \times 0,68) \times 10^{-5} \approx 4,15 \times 10^{-5}.$$

Сравнивая полученное значение с табличным значением δ_w , мы получаем экспериментальную плотность вольфрама $\rho_w^E \approx 17,3 \pm 0,4 \text{ г/см}^3$, что составляет примерно ~ 90 % плотности массива. Эта величина также близка к оценочному значению $17,6 \text{ г/см}^3$, приводимому в литературе [15].

Мы также проделали аналогичные расчеты скорости осаждения вольфрама, вычисленной по 5 первым точкам (см. подраздел 3.4), и получили плотность вольфрама $\sim 18 \text{ г/см}^3$, что на $\sim 6,5$ % меньше табличного значения. Хотя оценочные данные немного

отличаются от табличных, можно определенно сказать, что слои вольфрама имеют плотность ниже, чем у массива.

Приведенные выше оценки делались на основе расчетов, используя табличные плотности компонентов. Однако, как мы можем убедиться, реальные плотности экспериментально полученных пленок ниже табличных, т. е. необходимо учесть этот факт. Расчеты показывают, что расхождения с нашими вычислениями будут заметны в случае отклонения плотности хотя бы одного из компонентов. При пропорциональном изменении плотностей всех компонентов в реакции объемные соотношения, используемые в оценках, сохраняются. Так мы видим, что плотности слоев вольфрама и кремния примерно на ~ 10 % ниже табличных, и зависимость $\Delta d/t_w$ для первых трех точек на рис. 6 имеет тангенс угла наклона (0,97), соответствующий табличному значению (0,9725). Поэтому можно ожидать, что плотность дисилицида в формируемых слоях также будет меньше табличной.

Мы сделали аналогичные построения для первых трех экспериментальных точек 1-го участка на рис. 6, чтобы оценить плотность дисилицидного слоя. Для построения зависимости ($\bar{\delta} \times d$) от t_{WSi_2} мы в выражении (2) опустили данные для вольфрама (т. е. использовали двухслойную модель строения МРЗ в виде WSi_2/Si), а чтобы получить толщину дисилицида, помножили экспериментальную толщину вольфрама t_w на множитель, связывающий t_w и t_{WSi_2} ($t_w/t_{WSi_2} = 2,55$). Кроме того, мы учли, что при силицидообразовании меняется доля W-содержащего слоя в периоде, и при образовании дисилицида она должна составлять не $\beta_w = 0,259$, а $\beta_{WSi_2} = 0,882$, и использовали этот факт в форме, аналогично выражению (4). В результате мы получили плотность силицида $\rho_{WSi_2}^E \approx 9,4 \pm 0,3 \text{ г/см}^3$ ($\sim 10,7 \text{ г/см}^3$ для усреднения по первым 5 точкам), т. е. на ~ 5 % ниже табличной плотности WSi_2 . Для того, чтобы наши оценочные величины сошлись с экспериментальными результатами, мы полагаем, что плотности всех слоев примерно на 7–9 % ниже табличных значений, т. е. $\rho_{Si}^E \approx 2,15 \text{ г/см}^3$, $\rho_w^E \approx 17,7 \text{ г/см}^3$, $\rho_{WSi_2}^E \approx 9,1 \text{ г/см}^3$.

Повышенное значение плотности дисилицида, получаемое при обработки первых 5 точек 1-го участка на рис. 6, по сравнению с табличным свидетельствует о том, что по мере роста этой прослойки осаждаемые атомы вольфрама взаимодействует с кремнием не полностью при формировании слоя WSi_2 , либо в этом подслое появляется другой силицид.

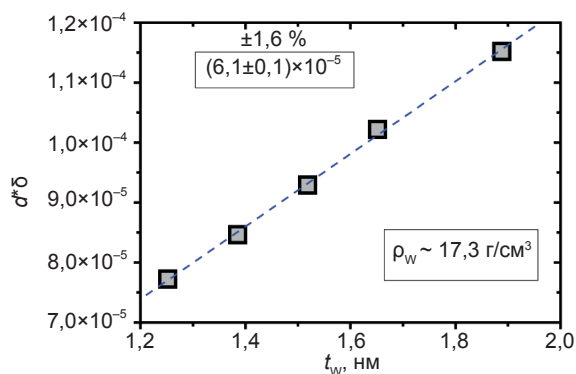


Рис. 8. График зависимости $(\bar{\delta} \times d)$ от t_w для оценки плотности слоя W (см. текст)

3.7. Подгонка малоугловых рефлектограмм

Мы уже сделали оценку плотности дисилицидной прослойки (1-й участок на рис. 6) и слоя аморфного вольфрама (3-й участок на рис. 6). Теперь для подгонки малоугловых кривых отражения нам необходимо оценить плотность и состав прослойки, соответствующей 2-му участку на рис. 6. Толщина слоя W, формирующего эту прослойку, составляет 0,548 нм, а усадка, которую дает эта прослойка, равна 0,239 нм. Тангенс угла наклона $\Delta d/t_w$ для силицида W_5Si_3 примерно равен 0,31, поэтому для 2-го участка величину $\Delta d/t_w \sim 0,436$ можно получить, комбинируя составом двух-трех веществ, одним из которых обязательно будет WSi_2 . В нашем распоряжении три возможных варианта подбора материалов для построения этой прослойки с требуемым $\Delta d/t_w$: 1) WSi_2 и W; 2) WSi_2 и W_5Si_3 ;

3) WSi_2 , W_5Si_3 и W. Расчеты показывают, что необходимый выходной параметр $\Delta d/t_w$ получится, если, например, в первом варианте прослойка будет иметь состав 43,2 об. % WSi_2 и 56,8 об. % W. Для второго варианта доли компонентов будут другие: 16,7 об. % WSi_2 и 83,3 об. % W_5Si_3 (или $WSi_{0,6}$). Сопутствующие параметры расчетов для первых двух вариантов представлены в табл. 1. Обращает на себя внимание, что, несмотря на заметно различающийся состав компонентов, общая толщина и плотности обоих вариантов оказались близки. Отличия не превышают 7 %. Другими словами при подгонке эти варианты будут трудно различимыми. Кроме того, 3-й вариант, который является комбинацией первых двух, ничего существенного привнести не может, т.е. при любых приемлемых сочетаниях компонентов он будет занимать промежуточное положение между первыми двумя.

Таким образом, изготовленные МРЗ W/Si имеют следующую структуру: 1) слой аморфного кремния (α -Si) плотностью $\rho \sim 2,15$ г/см³ (эти данные взяты из литературы [14]); 2) силицидную прослойку номинальным составом WSi_2 ; плотностью 9,1–10,7 г/см³; и общей толщиной $t < 1,8$ нм; 3) силицидную прослойку номинальным составом $WSi_{0,46}$ – $WSi_{0,74}$; плотностью $\rho \sim 14,1 \pm 0,5$ г/см³; и общей толщиной $t < 0,93$ нм; 3) слой аморфного вольфрама (α -W) плотностью $\sim 17,7$ г/см³. Ясно, что описанная 4-слойная структура может реализоваться только для МРЗ с толщиной вольфрама $t_w > 1,3$ нм, где можно ожидать наличие всех указанных слоев. При меньших толщинах вольфрама строение МРЗ будет ограничено только теми слоями, которые могут физически образоваться. Например, для $t_w < 0,7$ нм строение многослойных систем W-Si можно будет описывать в рамках двухслойной модели.

Таблица 1

Результаты расчета параметров слоев для 2-го участка на рис. 6 (усадка $\Delta d \sim 0,239$ нм, $\Delta t_w \sim 0,548$ нм, $\Delta d/t_w \sim 0,42$)

№	Продукты реакции	x- WSi_2 об. %	t- WSi_2 нм	t- $WSi_{(0,6)}$ нм	t _{общая} нм	Состав	г/см ³
1	$WSi_2 + W$	43,2	0,627	0,302	0,929	$WSi_{0,46}$	14,6
2	$WSi_2 + W_5Si_3$	16,7	0,242	0,686	0,928	$WSi_{0,74}$	13,6

На рис. 3 сплошными линиями показаны подгоночные кривые к соответствующим МРЗ. При изменении плотностей слоев в пределах, указанных выше, различия в подгоночных кривых были несущественными, и их можно было компенсировать небольшим изменением других подгоночных параметров: шероховатостью и толщинами слоев. Расчетные кривые, представленные на рис. 3, были получены для следующих плотностей слоев: $2,1 \text{ г/см}^3$ (Si), $10,4 \text{ г/см}^3$ (WSi_2), $14,1 \text{ г/см}^3$ ($\text{WSi}_{0,5-0,7}$) и $17,5 \text{ г/см}^3$ (W). Следует также отметить, что при подгонке МРЗ, в которых ожидалось появление α -W, заметное улучшение подгонки достигалось, если делать перекоп по толщинам силицидных прослоек в большую сторону на нижней границе слоя α -W по отношению к верхней, с примерным соотношением $(1,5-2)/1$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В наших исследованиях была выявлена усадка объема МРЗ W/Si в процессе их изготовления, которая составила ~ 1 нм. Из этой величины ~ 90 % усадки связано с образованием силицидов, и ~ 10 % приходится на распыление кремния с подложки уже после его нанесения. Распыление кремния, скорее всего, происходит на начальной стадии осаждения слоя вольфрама, когда еще открыта поверхность осажденного слоя кремния. Мы считаем, что распыление кремния происходит до формирования сплошного слоя дисилицида ($t\text{-WSi}_2 < 0,7$ нм), т. е. при толщинах $t_w < 0,45$ нм. Другими словами форма графика на рис. 6 и соответствующие оценки, сделанные на основе данных из этого рисунка, не поменяются, если учесть факт распыления кремниевого слоя. Необходимо только сдвинуть весь график на $\sim 0,1$ нм вниз.

В литературе [4] обсуждаются процессы образования структуры в аморфных системах Me-Si и делаются выводы о формировании «симметричных» силицидных прослоек (т. е. прослоек одинаковой толщины) относительно металлического слоя. В наших исследованиях наблюдается формирование двух силицидных прослоек различного состава (рис. 6): близких по составу к WSi_2 и W_5Si_3 ($\text{WSi}_{0,6}$), соответственно. При толщинах

$t_w > 1,25$ нм в многослойных образцах остается аморфный вольфрам в несвязанном состоянии. На самом деле слой чистого α -W в процессе осаждения слоя вольфрама на поверхности образовавшегося WSi_2 появляется при толщинах $t_w < 1,25$ нм, и затем он уже связывается кремнием, осаждаемым на слой вольфрама, при формировании прослойки состава $\text{WSi}_{0,6}$. Именно момент появления слоя α -W на поверхности подслоя WSi_2 в процессе осаждения вольфрама определяет точку разделения силицидных прослоек на верхнюю и нижнюю. В наших моделированиях теоретическими кривыми экспериментальных рефлектограмм наблюдалось улучшение совпадения, когда делался асимметричный перекоп по толщинам силицидных прослоек. В этом случае граница должна проходить при $t_w \sim 0,7$ нм (рис. 6), т. е. в области «излома» или смены типа силицидной прослойки. Таким образом, можно утверждать, что в многослойной системе W-Si наблюдается асимметричное формирование силицидных прослоек как по фазовому составу, так и по толщине.

На основании вышеизложенного можно построить модель роста МРЗ W/Si. На рис. 9 представлена схема строения одного периода для многослойных образцов, в которых присутствуют все подслои ($d > 3,8$ нм): α -Si, α -W, α - WSi_2 и α - $\text{WSi}_{0,6}$.

При уменьшении периода в первую очередь будут уменьшаться толщины α -W и α -Si. Когда исчезнет подслой α -W, начнет уменьшаться подслой α - $\text{WSi}_{0,6}$, а затем и подслой α - WSi_2 . Обращаем внимание, что подслоем α - WSi_2 неоднороден по толщине и с увеличением толщины обедняется кремнием примерно на 10 %. Это можно было ожидать, поскольку верхняя часть этого подслоя формируется при осаждении атомов вольфрама на уже сформировавшийся дисилицид, и атомам кремния для силицидообразования приходится диффундировать через уже образовавшийся слой дисилицида.

Мы обращаем внимание, что при осаждении атомов W на слой α -Si формируется преимущественно дисилицид, в отличие от верхней границы, где при осаждении атомов Si на слой α -W формируется в основном сплав α - $\text{WSi}_{0,6}$.

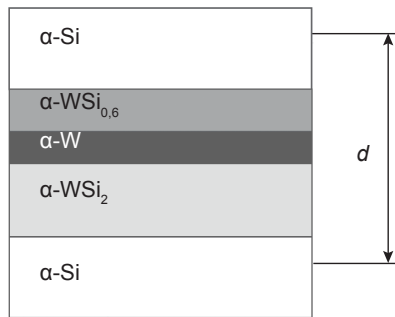


Рис. 9. Схематическое изображение одного периода МРЗ W/Si для образцов, содержащих все подслои ($d > 3,8$ нм), в соответствии с предлагаемой моделью роста

5. ВЫВОДЫ

В результате исследования структуры и фазового состава МРЗ W/Si, осажденных методом прямого магнетронного распыления, установлено, что в процессе роста формируются силицидные прослойки, которые приводят к объемной усадке многослойного покрытия $\sim 25\%$. Распыление уже осажденного слоя α -Si с подложки также приводит к усадке периода, однако масштаб этого изменения примерно на порядок меньше по сравнению с силицидообразованием.

Наблюдается формирование асимметричных как по толщине, так и по составу силицидных прослоек относительно слоя α -W с преимущественным содержанием кремния (WSi_{2-x}) на межфазной границе W-на-Si и преимущественным содержанием вольфрама ($WSi_{0,6\pm x}$) на межфазной границе Si-на-W с примерным соотношением толщин $t_{WSi_2}/t_{WSi_{0,6}} \sim 1,5-2$.

Построена модель роста МРЗ W/Si, согласно которой до толщины $t_w < 0,7$ вольфрам растет в связанном с кремнием состоянии в виде слоя силицида α - WSi_2 толщиной $t < 1,8$ нм. Плотность дисилицида увеличивается с ростом толщины вольфрама, что сопровождается снижением содержания кремния на $\sim 10\%$. При толщинах вольфрама $0,7 < t_w < 1,3$ нм состав силицидной прослойки меняется и становится α - $WSi_{0,6}$ и его толщина может составлять $t < 0,93$ нм. Дальнейший рост слоя вольфрама приводит к появлению слоя аморфного вольфрама, не связанного с кремнием. Этот слой растет между двух силицидных прослоек.

Показано, что плотности всех слоев, составляющих МРЗ W/Si, примерно на 7–9 % меньше плотностей соответствующих массивов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Uspenskii Yu. A., Levashov V. E., Vinogradov A. V., Fedorenko A. I., Kondratenko V. V., Pershin Yu. P., Zubarev E. N., and Fedotov V. Yu. High-reflectivity multilayer mirrors for a vacuum-ultraviolet interval of 35–50 nm // *Opt. Lett.* — 1998. — Vol. 23, No. 10. — P. 771–773.
2. Zubarev E. N., Zhurba A. V., Kondratenko V. V., Pinegyn V. I., Sevryukova V. A., Yulin S. A., Feigl T., Kaiser N. The structure, diffusion and phase formation in Mo/Si multilayers with stressed Mo layers // *Thin Solid Films.* — 2007. — Vol. 515, No. 17. — P. 7011–7019.
3. Windt D. L., Christensen F. E., Craig W. W., Hailey C., Harrison F. A., Jimenez-Garate M., Kalyanaraman R., and Mao P. H. Growth, structure, and performance of depth-graded W/Si multilayers for hard x-ray optics // *J. Appl. Phys.* — 2000. — Vol. 88, No. 1. — P. 460–470.
4. Shih W. C. and Stobbs W. M. The measurement of the roughness of W/Si multilayers using the Fresnel method // *Ultramicroscopy.* — 1990. — Vol. 32, No. 3. — P. 219–239.
5. Petford-Long A. K., Stearns M. B., Chang C.-H., Nutt S. R., Stearns D. G., Ceglio N. M., and Hawryluk A. M. High-resolution electron microscopy study of x-ray multilayer structures // *J. Appl. Phys.* — 1987. — Vol. 61, No. 4. — P. 1422–1428.
6. Kessels M. J. H., Verhoeven J., Tichelaar F. D., Bijkerk F. Si adhesion interlayer effects in hydrogen passivated Si/W soft X-ray multilayer mirrors // *Surf. Sci.* — 2006. — Vol. 600, No. 6. — P. 1405–1408.
7. Hasan M. M., Highmore R. J. and Somekh R. E. The uhv deposition of short-period multilayers for X-ray mirror applications // *Vacuum.* — 1992. — Vol. 43, No. 1/2. — P. 55–59.
8. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений. Справочник / Под ред. Т. Я. Косолаповой. — М.: «Металлургия», 1986. — 928 с.
9. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник / Под ред.

- Н. П. Лякишева. — М.: «Машиностроение», 2000, Т. 3, Книга 2. — С. 301–302.
10. Решетняк Е. Н., Малыхин С. В., Першин Ю. П., Пугачев А. Т. Рентгенографический анализ периодических пленочных композиций W/Si // Вопросы атомной науки и техники. — 2003. — № 3. — С. 161–166.
 11. Voorma H. J., Louis E., Koster N. B., Bijkerk F. and Spiller E. Characterization of multilayers by Fourier analysis of *x*-ray reflectivity // J. Appl. Phys. — 1997. — Vol. 81, No. 9. — P. 6112–6119.
 12. Зеркальная рентгеновская оптика / Под ред. А. В. Виноградова. — Ленинград: «Машиностроение», 1989. — 317 с.
 13. Henke B. L., Gullikson E. M., and Davis J. C. *X*-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E = 50\text{--}30000$ eV, $Z = 1\text{--}92$ // Atomic data and nuclear tables. — 1993. — Vol. 54, No. 2. — P. 181–342.
 14. Gautier J., Delmotte F., Bridou F., Ravet M. F., Varniere F., Roulliay M., Jerome A., Vickridge I. Characterization and optimization of magnetron sputtered Sc/Si multilayers for extreme ultraviolet optics // Appl. Phys. A. — 2007. — Vol. 88, No. 4. — P. 719–725.
 15. Christensen F. E., Hornstrup A. and Schnopper H. W. High-resolution *X*-ray diffraction studies of multilayers // J. Appl. Cryst. — 1988. — Vol. 21, No. 3. — P. 252–257.
 - Phys. — 2000. — Vol. 88, No. 1. — P. 460–470.
 4. Shih W. C. and Stobbs W. M. The measurement of the roughness of W/Si multilayers using the Fresnel method // Ultramicroscopy. — 1990. — Vol. 32, No. 3. — P. 219–239.
 5. Petford-Long A. K., Stearns M. B., Chang C.-H., Nutt S. R., Stearns D. G., Ceglio N. M., and Hawryluk A. M. High-resolution electron microscopy study of *x*-ray multilayer structures // J. Appl. Phys. — 1987. — Vol. 61, No. 4. — P. 1422–1428.
 6. Kessels M. J. H., Verhoeven J., Tichelaar F. D., Bijkerk F. Si adhesion interlayer effects in hydrogen passivated Si/W soft *X*-ray multilayer mirrors // Surf. Sci. — 2006. — Vol. 600, No. 6. — P. 1405–1408.
 7. Hasan M. M., Highmore R. J. and Somekh R. E. The uhv deposition of short-period multilayers for *X*-ray mirror applications // Vacuum. — 1992. — Vol. 43, No. 1/2. — P. 55–59.
 8. Svoystva, poluchenie i primeneniye tugoplavkikh soedinenij. Spravochnik / Pod red. T. Ya. Kosolapovoj. — М.: «Metallurgiya», 1986. — 928 p.
 9. Diagrammy sostoyaniya dvojnyh metallicheskih sistem. Spravochnik / Pod red. N. P. Lyakisheva. — М.: «Mashinostroenie», 2000, Vol. 3, Книга 2. — P. 301–302.
 10. Reshetnyak E. N., Malyhin S. V., Pershin Yu. P., Pugachev A. T. Rentgenograficheskij analiz periodicheskikh plenochnykh kompozicij W/Si // Voprosy atomnoj nauki i tehniki. — 2003. — No. 3. — P. 161–166.
 11. Voorma H. J., Louis E., Koster N. B., Bijkerk F. and Spiller E. Characterization of multilayers by Fourier analysis of *x*-ray reflectivity // J. Appl. Phys. — 1997. — Vol. 81, No. 9. — P. 6112–6119.
 12. Zerkal'naya rentgenovskaya optika / Pod red. A. V. Vиноградова. — Ленинград: «Mashinostroenie», 1989. — 317 p.
 13. Henke B. L., Gullikson E. M., and Davis J. C. *X*-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E = 50\text{--}30000$ eV, $Z = 1\text{--}92$ // Atomic data and nuclear tables. — 1993. — Vol. 54, No. 2. — P. 181–342.
 14. Gautier J., Delmotte F., Bridou F., Ravet M. F., Varniere F., Roulliay M., Jerome A., Vickridge I. Characterization and optimization

LITERATURA

1. Uspenskii Yu. A., Levashov V. E., Vinogradov A. V., Fedorenko A. I., Kondratenko V. V., Pershin Yu. P., Zubarev E. N., and Fedotov V. Yu. High-reflectivity multilayer mirrors for a vacuum-ultraviolet interval of 35–50 nm // Opt. Lett. — 1998. — Vol. 23, No. 10. — P. 771–773.
2. Zubarev E. N., Zhurba A. V., Kondratenko V. V., Pinegyn V. I., Sevryukova V. A., Yulin S. A., Feigl T., Kaiser N. The structure, diffusion and phase formation in Mo/Si multilayers with stressed Mo layers // Thin Solid Films. — 2007. — Vol. 515, No. 17. — P. 7011–7019.
3. Windt D. L., Christensen F. E., Craig W. W., Hailey C., Harrison F. A., Jimenez-Garate M., Kalyanaraman R., and Mao P. H. Growth, structure, and performance of depth-graded W/Si multilayers for hard *x*-ray optics // J. Appl.

- of magnetron sputtered Sc/Si multilayers for extreme ultraviolet optics // *Appl. Phys. A.* — 2007. — Vol. 88, No. 4. — P. 719–725.
15. Christensen F. E., Hornstrup A. and Schnopper H. W. High-resolution X-ray diffraction studies of multilayers // *J. Appl. Cryst.* — 1988. — Vol. 21, No. 3. — P. 252–257.

УДК. 24621.472.629.78

ПОВЕРХНЕВІ НАНОСТРУКТУРИ КОНДЕНСАТУ CdTe НА СКЛІ ТА СИТАЛІ

Я. П. Салій¹, І. С. Биліна¹, О. Л. Соколов²

¹Кафедра фізики і хімії твердого тіла,

²Фізико-хімічний інститут,

ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»,
Івано-Франківськ, Україна

Надійшла до редакції 18.12.2015

Виконано дослідження структур на поверхні конденсату CdTe, осажденного методом гарячої стінки на підкладках із скла та ситалу. З топограм атомно-силового мікроскопа методом водорозділу одержано нормальні h і латеральні D розміри поверхневих об'єктів та побудовано їх гістограми розподілу. Проаналізовано залежності середніх значень нормальних і латеральних розмірів та фактора форми кристалітів від технологічних умов: часу осадження, температур підкладки і випарника. Підтверджено кореневу квадратичну залежність середніх розмірів від тривалості осадження.

Ключові слова: кадмій телурид, наноструктури, парофазний конденсат, кінетика росту, фактор форми.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ КОНДЕНСАТА CdTe НА СТЕКЛЕ И СИТАЛЛЕ

Я. П. Салий, И. С. Былина, А. Л. Соколов

Выполнены исследования структур на поверхности конденсата CdTe, осажденного методом горячей стенки на подложках из стекла и ситалла. Из топограмм атомно-силового микроскопа способом водораздела получены нормальные и латеральные размеры поверхностных объектов и построены их гистограммы распределения. Проанализированы зависимости средних значений нормальных и латеральных размеров, а также фактора формы кристаллитов от технологических условий: времени осаждения, температур подложки и испарителя. Подтверждено корневую квадратичную зависимость средних размеров от продолжительности осаждения.

Ключевые слова: кадмий теллурид, наноструктуры, парофазный конденсат, кинетика роста, фактор формы.

SURFACES NANOSTRUCTURES OF CONDENSATE CdTe ON GLASS AND CERAMICS

Ya. P. Saliy, I. S. Bylina, O. L. Sokolov

The research of structures on the surface of condensate CdTe, deposited by a method hot wall on substrates of glass and ceramics, are investigated. Normal and lateral sizes of surface objects are obtained from the topography of an atomic force microscope by a method watershed and their distribution histogram are constructed. The depending of mean values of normal, lateral size and form factor of crystallites from technological conditions: deposition time, substrate temperature and vaporization temperature are analyzed. The root quadratic dependence of the average sizes on the duration deposition is confirmed.

Keywords: cadmium telluride, nanostructures, vapor-phase condensate, kinetics of growth, form factor.

ВСТУП

Напівпровідник CdTe кристалізується у структурі цинкової обманки зі сталою ґратки $a = 6,481 \text{ \AA}$ та плавиться при $1074 \text{ }^\circ\text{C}$ [1, 2]. Він є перспективним матеріалом, має вдалу для практичного використання сукупність основних фізико-хімічних

параметрів: високий коефіцієнт поглинання, малу концентрацію власних носіїв заряду, добрі механічні та теплові характеристики [3]. Телурид кадмію p - типу провідності є оптимальним матеріалом для створення високоефективних сонячних елементів наземного використання [4]. Ширина

забороненої зони напівпровідника 1,45 eV відповідає максимуму спектра сонячного випромінювання, тому сонячні елементи з базовим шаром телуриду кадмію мають високий коефіцієнт корисної дії.

На сьогодні існує значна кількість методів одержання тонких шарів CdTe, серед яких перспективним є метод квазізамкненого об'єму [5–9]. Цей метод, завдяки конструктивним особливостям випарника, дає змогу одержувати плівки високої чистоти під час добре контрольованого технологічного процесу.

У цей час дослідження даного матеріалу в якості складової сонячних елементів перебуває в активній фазі вивчення [10–13]. Однак велика кількість невирішених фізико-технологічних проблем стають перешкодою на шляху до отримання якісних функціональних плівок CdTe з контрольованими властивостями. Тому важливим є вивчення механізмів формування тонких плівок CdTe [14–20]. Ці проблеми зумовлені складністю процесів випаровування і перенесення речовини у паровій фазі, конденсації пари на підкладку тощо. В даній роботі представлено результати дослідження процесу формування об'єктів на поверхні конденсату CdTe, що є продовженням наших попередніх досліджень [21, 22] для інших матеріалів.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Плівкові конденсати CdTe осаджували методом гарячої стінки на хімічно очищені підкладки зі скла та ситалу. Температуру підкладки T_s задавали в межах 420–520 K, а температуру випаровування T_v наважки із наперед синтезованої сполуки CdTe — в інтервалі 670–770 K. У цій області температур CdTe випаровується конгруентно з більш ніж 98 % молекул CdTe у парі [23]. Температура стінки T_w підтримувалась на 50 K вище температури випарника, завдяки чому унеможлилювалося осадження молекул на стінку. При цьому тривалість осадження складала 20–60 с.

Топологію поверхні зразків досліджували методами атомно-силової мікроскопії (АСМ) Nanoscope 3a Dimension 3000 у режимі періодичного контакту. Квадратне поле

зображення поверхні конденсату розміром 1 мкм² представлено масивом 512² точок. Отримані АСМ-зображення аналізували у середовищі програми Gwyddion, де за допомогою методу водорозділу визначено розміри окремих об'єктів у нормальному h та латеральному D відносно поверхні підкладки напрямках. Використовуючи програму OriginPro 8.5.1, побудовано залежності середніх значень h_m і D_m та фактора форми $k = h/D$ від технологічних факторів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Топологія поверхні конденсатів. Як відомо, процеси зародження і росту тонкопліткових наноструктур мають складний характер [24]. В результаті формування тонкої плівки мають місце наступні етапи структуроутворення: адсорбція, десорбція, виникнення критичних зародків, ріст і коалесценція двовимірних острівців. Розрізняють три механізми зародження тонкопліткових конденсатів. Перший, зародковий механізмом росту Фолмера-Вебера, реалізується на атомно-гладких щільно упакованих гранях ідеального кристала. Такими гранями являються грані із малими індексами Міллера. Ріст плівок в цьому випадку відбувається через початкове формування двовимірних чи тривимірних зародків, які в подальшому розростаються в суцільну плівку на поверхні підкладки. Другий, пошаровий механізм зародження (механізм Франка-ван-дер-Мерве), реалізується при наявності на поверхні підкладки нерівностей, джерелом яких є природна шорсткість граней з великими індексами Міллера. При даному механізмі відсутня необхідність в утворенні зародків. Проміжним, між відзначеними вище двома, є механізм зародження Странскі-Крастанова, який передбачає на початкових етапах осадження утворення так званого змочувального шару з подальшим ростом тривимірних наноструктур за рахунок зняття пружних деформацій [25].

Для випадку росту тривимірних наноструктур, важливим є їх розподіл за розмірами як у латеральному, так і у нормальному напрямках по відношенню до поверхні підкладки, на якій осаджується конденсат, а також їх поверхнева щільність

та однорідність. Згадані параметри утворень можна задавати родом підкладки, кількістю осадженого на поверхню матеріалу та швидкістю його осадження. У зв'язку із цим визначення механізмів зародження і росту наноструктур, а також залежності розподілу їх за розмірами від умов осадження є важливою задачею як теорії, так і практики.

У таблиці наведено технологічні параметри отримання конденсату, а також характеристики після обробки АСМ-зображення. На рис. 1 продемонстровано 2D АСМ-зображення (I) і гістограми розподілу нормальних (II) та латеральних (III) розмірів поверхневих кристалітів конденсатів, отриманих на підкладках із ситалу при різному часі осадження. Гістограми розподілу висот будувалися із кроком 5 нм, а діаметрів — 10 нм. При $\tau = 20$ с максимум розподілу висот знаходиться в інтервалі 5–10 нм (рис. 1, Па, а латеральних розмірів — 30–40 нм (рис. 1, Пб). При збільшенні тривалості осадження до 30 с максимумами розподілу розмірів наноструктур на поверхні конденсату (рис. 1, Пб, Пб) зміщуються в область більших значень.

Аналогічне представлення для конденсатів на підкладках із скла при різних температурах осадження наведено на рис. 2. Тут як для висот, так і для діаметрів побудова гістограм розподілу відбувалася із кроком 10 нм. В даному випадку суттєвого зміщення максимуму розподілів від температури підкладки не спостерігається. Зокрема для висот об'єктів максимум розподілу як при $T_s = 470$ К (рис. 2, Па), так і $T_s = 520$ К (рис. 2, Пб) знаходиться в межах 20–30 нм. Для діаметрів проявляється така сама тенденція, де максимумами розподілу також не зміщуються з температурою осадження і знаходяться в інтервалі 40–50 нм.

Розглянемо також середні розміри наноструктур (таблиця), оскільки гістограми розподілу даних характеристик є асиметричними. Так, при збільшенні температури осадження спостерігається деяке зменшення середніх розмірів наноструктур як на підкладці зі скла, так і на підкладці із ситалу (рис. 3 а). Зауважимо, що за сталої тривалості осадження середні розміри об'єктів на склі є більшими, ніж на ситалі. Це пояснюється відмінністю підкладок, скло є аморфним,

Таблиця

Технологічні фактори отримання та структурні характеристики парофазних конденсатів CdTe, осаджених на підкладки із скла та ситалу

Технологічні параметри				Структурні характеристики					
Змінний параметр	Сталі параметри	Значення змінного параметра	№ зразків	h_m , нм		D_m , нм		k	
				скло	ситал	скло	ситал	скло	ситал
τ , с	$T_v = 770$ К	20	15	19	8	62	48	$0,30 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,01$
	$T_s = 520$ К	30	14	36	25	88	51	$0,42 \pm 0,03$	$0,48 \pm 0,01$
	$T_w = 820$ К	60	13	41	50	106	75	$0,36 \pm 0,02$	$0,70 \pm 0,03$
T_s , К	$T_v = 720$ К	420	25	67	17	86	50	$0,81 \pm 0,05$	$0,34 \pm 0,01$
	$T_w = 770$ К	470	26	34	18	79	54	$0,44 \pm 0,02$	$0,34 \pm 0,01$
	$\tau = 60$ с	520	27	33	17	57	43	$0,55 \pm 0,02$	$0,38 \pm 0,01$
T_v , К	$T_{II} = 520$ К	670	23	31	8	80	49	$0,37 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,01$
	$T_w = T_v + 50$ К	720	27	33	17	57	43	$0,55 \pm 0,02$	$0,38 \pm 0,01$
	$\tau = 60$ с	770	13	41	50	106	75	$0,36 \pm 0,02$	$0,70 \pm 0,03$

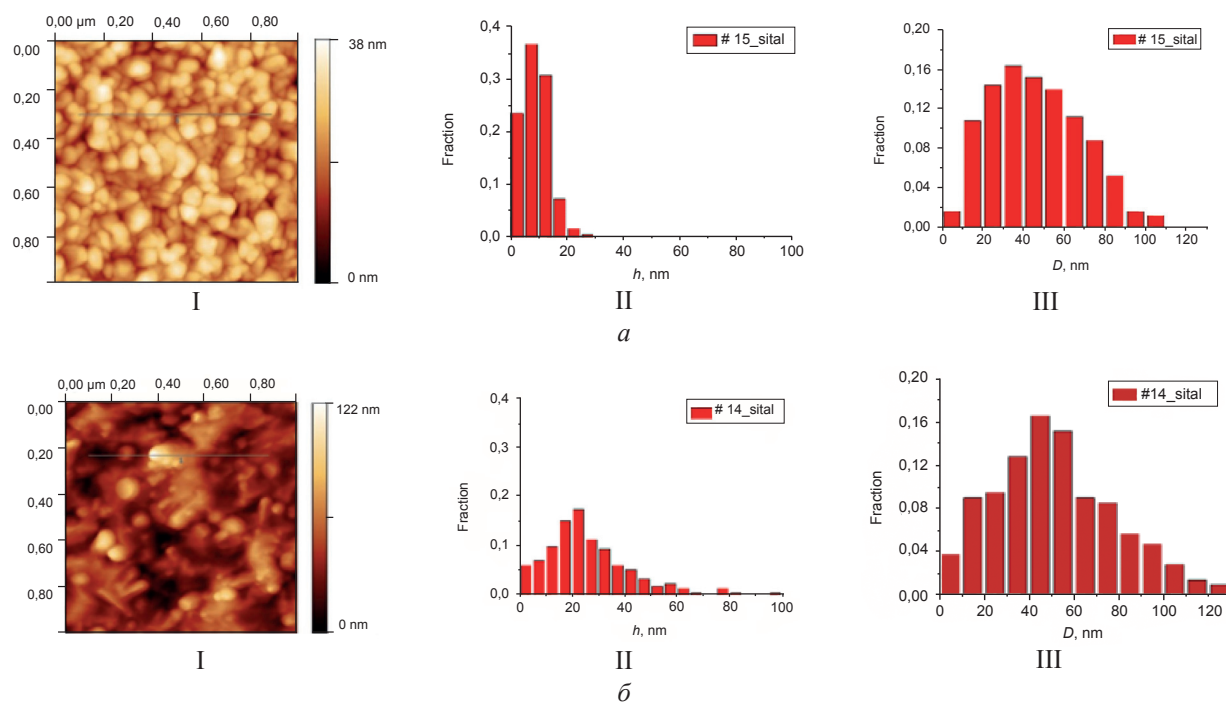


Рис. 1. 2D АСМ-зображення (I) та гістограми розподілу висот (II) і латеральних розмірів (III) поверхневих нанокристалітів парофазних конденсатів CdTe, отриманих на підкладках із ситалу для часу осадження τ , с: 20, 30 ; а) зразок № 15 і б) — № 14 відповідно

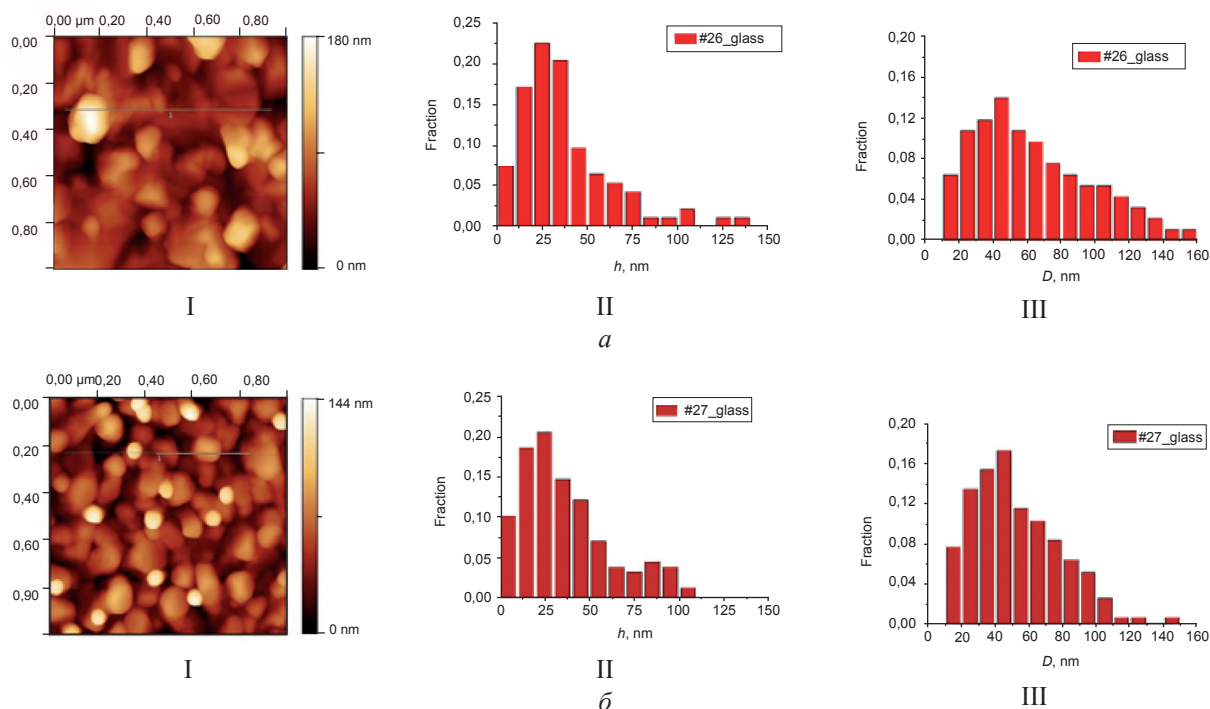


Рис. 2. 2D АСМ-зображення (I) та гістограми розподілу нанокристалітів за висотою (II) і латеральними розмірами (III) у конденсатах CdTe, отриманих на підкладках зі скла при температурі підкладки T_{II} , К: 470, 520; а) зразок № 26 і б) — № 27 відповідно

а ситал — полікристалічним. Кристаліти розмірами менше 1 мкм пов'язані між собою скловидним прошарком, тому епітаксійні об'єкти на його поверхні можуть формуватися на окремих площинах кристалітів.

При збільшенні температури випарування простежується збільшення середніх нормальних та латеральних розмірів наноструктур на обох видах підкладок (рис. 3б; таблиця). Така залежність пов'язана з тим,

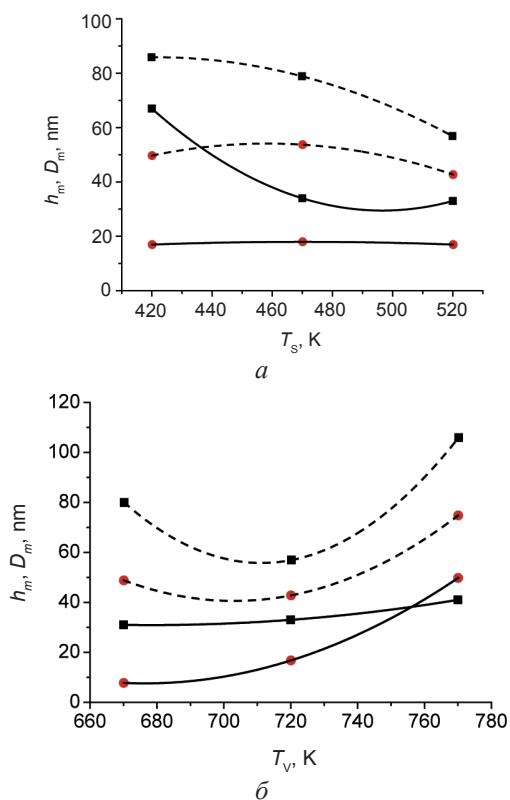


Рис. 3. Залежності середніх нормальних (суцільні криві) та латеральних (штриховані криві) розмірів нанокристалів у парофазних конденсатах CdTe, отриманих на підкладках зі скла (квадрати) і ситалу (круги) від температури підкладки T_s (а) та температури випарування T_v (б) (таблиця)

що при збільшенні температури випарування збільшується інтенсивність потоку атомів з парової фази на поверхню підкладки, а адатоми, маючи при цьому більшу енергію, спроможні створювати хімічні зв'язки із зародками нової фази та вже сформованими острівцями.

Кінетика росту нанокристалів. Контрольоване вирощування плівкових структур з потрібними властивостями можна реалізувати керуючи процесами росту. Опис реальної кінетики формування зародків нової фази і подальше заповнення ними осаджуваної поверхні – одна із основних задач теорії поверхневих фазових переходів першого роду [26]. Важливим моментом будь-якої теорії є нелінійний зворотній зв'язок між перенасиченням і функцією розподілу острівців нової фази за розмірами, адже кластери, що ростуть, поглинають інші адатоми, тим самим зменшуючи перенасичення, від якого залежить швидкість їх формування і росту [27]. В роботі [28] досліджується кінетична модель росту тонкої плівки на твердій підкладці

за умови двовимірного утворення зародків. В умовах великих перенасичень газоподібної фази отримані розв'язки для функції розподілу острівців за розмірами на початковому етапі росту, ступеня заповнення підкладки на етапі коалесценції, швидкості вертикального росту плівки та шорсткості її поверхні. Дані розв'язки виражають структурні характеристики плівки через фізичні константи системи та параметри росту, зокрема, температуру випарування і підкладки, а також тривалості осадження. В роботі [28] отримано результат, згідно якого має місце закон, за яким середній розмір острівців росте пропорційно $(\tau - \tau^*)^{1/2}$, де τ^* — час затримки нуклеації острівців.

У результаті апроксимації залежності середніх нормальних розмірів від часу осадження степеневою функцією $h_m = a(\tau - \tau^*)^b$, для зразків, осаджених на підкладках зі скла, одержали $b = 0,09$, а на підкладках із ситалу — $0,54$, при цьому $\tau^* = 19$ с для обох підкладок. Для середніх латеральних розмірів D_m використана аналогічна залежність. Показник степеня b для зразків, отриманих на підкладках зі скла, становить $0,14$, а на підкладках із ситалу — $0,46$, при цьому для скла $\tau^* = 19$ с, а для ситалу 0 с. Як бачимо, для обох розмірів кристалів ситалу $b \approx 1/2$. Отже, ріст середніх нормальних h_m розмірів та середніх латеральних D_m розмірів наноструктур на ситалі для сполуки CdTe пропорційний $(\tau - \tau^*)^{1/2}$, що узгоджується з теоретичною залежністю [28]. Бачимо, що для латерального розміру острівців на ситалі відсутня затримка нуклеації. Експериментальні дані і апроксимаційні криві зображено на рис. 4. З кривих

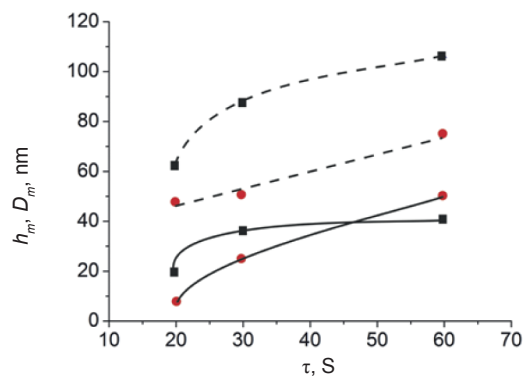


Рис. 4. Залежності середніх нормальних (суцільні криві) та латеральних (штриховані криві) розмірів нанокристалів у парофазних конденсатах CdTe, отриманих на підкладках зі скла (квадрати) і ситалу (круги) від часу осадження τ (таблиця)

видно, що при збільшенні часу осадження зменшується швидкість росту середніх діаметрів та висот об'єктів для обох підкладок.

Фактор форми. Для детальнішого аналізу зміни форми наноструктур на поверхні конденсатів CdTe в залежність від технологічних параметрів скористаємося фактором форми. Побудовано точки на площині у координатах латеральний, нормальний розмір кристаліта. Так, на рис. 5 наведено (характерний для всіх зразків) двовимірний розкид нормальних і латеральних розмірів кристалітів парофазного конденсату CdTe (зразок № 25, таблиця), отриманого на підкладці із ситалу. Спостерігаємо кореляцію нормального і латерального розмірів. Отримані точки апроксимовані прямою, кутовий коефіцієнт k якої визначає середню величину фактора форми і становить $0,34 \pm 0,01$, тобто в середньому відношення нормального до латерального розміру об'єктів на поверхні h/D складає 0,34. Аналогічні розподіли були побудовані і для всіх інших зразків, на основі чого представлено залежності фактора форми від різних технологічних параметрів (рис. 6).

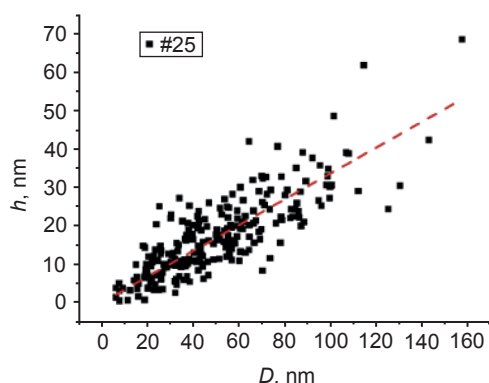


Рис. 5. Розкид нормального і латерального розмірів кристалітів у парофазному конденсаті CdTe (зразок № 25, таблиця), отриманого на підкладці із ситалу

Так, аналізуючи рис. 6а бачимо, що при збільшенні тривалості осадження має місце збільшення фактора форми як для зразка на склі, так і для зразка на ситалі. Проте на ситалі це збільшення відбувається інтенсивніше. Такі зміни фактора форми означають, що на початкових етапах осадження перевагу має латеральний ріст об'єктів, а при подальшій конденсації перевага переходить до нормального росту. Це можна пояснити наступним чином.

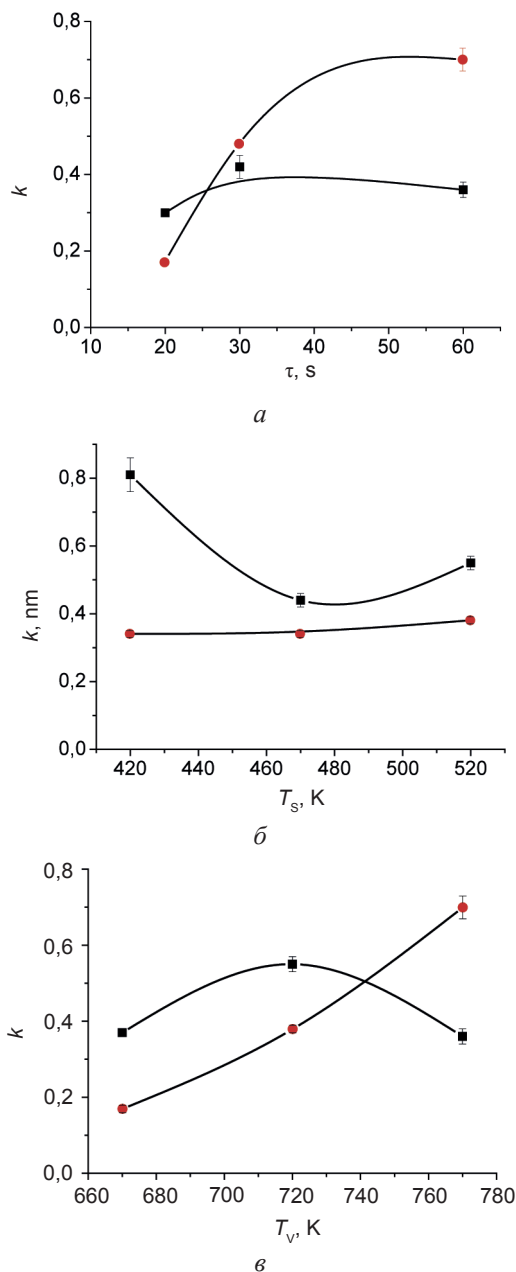


Рис. 6. Залежність фактора форми нанокристалітів у парофазних конденсатах CdTe, отриманих на підкладках зі скла (квадрати) і ситалу (круги) від часу осадження τ (а), температури підкладки T_s (б) та температури випарування T_v (в) (таблиця)

Так, згідно теорії, закладеної у роботах Оствальда [29], Ліфшица і Сльозова [30], Вагнера (ЛСВ) [31], Венгреневича [32] стосовно поверхневих дискретних систем і, зокрема, острівцевих плівок і напівпровідникових гетероструктур з квантовими точками, розрізняють дифузійний процес росту наноструктур і процес, контрольований швидкістю утворення хімічних зв'язків на їх поверхні (вагнерівський). Обидва процеси можуть реалізовуватися одночасно за умови, якщо електронні процеси утворення хімічних

зв'язків є активаційними і енергії активацій обох процесів — електронного і дифузійного — порівняні між собою.

Тож бачимо, що на початкових етапах конденсації перевагу має дифузійний ріст, і острівці інтенсивніше розростаються в латеральному напрямку, зливаючись при цьому один з одним, тим самим ще більше збільшуючи середні латеральні значення. У подальшому, коли в латеральному напрямку плівка розвинулася вже достатньо, відбувається перехід до інтенсивнішого нормального росту, і в даному випадку вже має перевагу вагнерівський процес росту.

При збільшенні температури підкладки, за сталого значення всіх інших параметрів спостерігається тенденція до зменшення фактора форми структур на склі і незначного збільшення на ситалі (рис. 6б).

Зростання температури випарування (рис. 6в), за незмінних інших параметрів призводить до залежності, яка проходить через максимум для фактора форми у зразках на підкладці із скла, та збільшення фактора форми для зразків на підкладці із ситалу.

ВИСНОВКИ

1. Представлено комплексне дослідження процесів структуроутворення у парофазних конденсатах CdTe, вирощених на підкладках із скла та ситалу.
2. Виявлено, що збільшення температури підкладки призводить до зменшення середніх нормальних h_m та латеральних D_m розмірів наноструктур, а збільшення температури випарування навпаки зумовлює їхній ріст.
3. Підтверджено, що значення середніх розмірів наноструктур на ситалі, в типовому для молекулярно-променевої епітаксії режимі повної конденсації, переважну частину часу ростуть пропорційно $(\tau - \tau^*)^{1/2}$, показник степеня у випадку підкладок зі скла становить $\sim 0,1$.
4. Встановлено, що при збільшенні тривалості осадження має місце збільшення фактора форми наноструктур як для зразків на склі, так і для зразків на ситалі, а збільшення температури підкладки, за сталого значення інших параметрів

призводить до його зменшення на склі і деякого збільшення на ситалі.

5. Показано, що на початкових етапах конденсації перевагу має дифузійний ріст, а при більшій тривалості осадження відбувається перехід до вагнерівського процесу росту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Медведева С. А. Физика и химия соединений $A^{II}B^{VI}$. — М: Мир, 1970. — 624 с.
2. Георгобиани А. Н., Шейнкман М. К. Физика соединений $A^{II}B^{VI}$. — М: Наука, 1986. — 319 с.
3. Брус В. В., Илащук М. И., Ковалюк З. Д., Марьянчук П. Д., Уляницкий К. С., Грицюк Б. Н. Механизмы токопереноса в анизотипных гетеропереходах n -TiO₂/p-CdTe. // ФТП. — 2011. — Т. 45, № 8. — С. 1109–1113.
4. Корбутяк Д. В., Мельничук С. В., Корбут Є. В., Борисик М. М. Телурид кадмію і домішково-дефектні стани та детекторні властивості. — К: Іван Федоров, 2000. — 198 с.
5. Бубнов Ю. З., Лур'є М. С., Старос Ф. Г., Филаретов Г. А. Вакуумное нанесение пленок в квазизамкнутом объеме. — Л: Энергия, 1975. — 161 с.
6. Калинин И. Н., Алесковский В. Б., Симашкевич А. В. Эпитаксиальные слои соединений $A^{II}B^{VI}$. — Л: Изд-во ЛГУ, 1978. — 235 с.
7. Фреїк Д. М., Горічок І. В., Соколов О. Л., Потяк В. Ю. Технологічні аспекти осадження плівок CdTe методом гарячої стінки // ФХТТ. — 2011. — Т. 12, № 1. — С. 89–94.
8. Bilevych Ye. O., Boka A. I., Darchuk L. O., Gumenjuk-Sichevska J. V. et al. Properties of CdTe thin films prepared by hot wall epitaxy // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2004. — Vol. 7, No. 2. — P. 129–132.
9. Косяк В., Опанасюк А. Явища перенесення та осадження у разі одержання плівок CdTe методом квазізамкнутого об'єму // Вісник Львів. ун-ту. Серія фізична. — 2008. — Т. 41. — С. 117–124.
10. Major J. D., Treharne, R. E., Phillips, L. J., & Durose, K. A low-cost non-toxic post-growth activation step for CdTe solar cells // Nature. — 2014. — Vol. 511, No. 7509. — P. 334–337.
11. Paudel N. R., Wieland K. A., Compaan A. D.

- Ultrathin CdS/CdTe solar cells by sputtering // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. — 2012. — Vol. 105. — P. 109–112.
12. Lin T., Huang F., Liang J., Wang Y. A facile preparation route for boron-doped graphene, and its CdTe solar cell application // *Energy & Environmental Science*. — 2011. — Vol. 4, No. 3. — P. 862–865.
 13. Gloeckler M., Sankin I., Zhao Z. CdTe solar cells at the threshold to 20 % efficiency // *Photovoltaics, IEEE Journal of*. — 2013. — Vol. 3, No. 4. — P. 1389–1393.
 14. Colletti L. P., Stickney J. L. Optimization of the growth of CdTe thin films formed by electrochemical atomic layer epitaxy in an automated deposition system // *Journal of the Electrochemical Society*. — 1998. — Vol. 145, No. 10. — P. 3594–3602.
 15. Moutinho H. R., Moutinho H. R., Hasoon F. S., et al. Investigation of polycrystalline CdTe thin films deposited by physical vapor deposition, close-spaced sublimation, and sputtering // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. — 1995. — Vol. 13, No. 6. — P. 2877–2883.
 16. Pandey S. K., Tiwari, U., Raman, R. et al. Growth of cubic and hexagonal CdTe thin films by pulsed laser deposition // *Thin Solid Films*. — 2005. — Vol. 473, No. 1. — P. 54–57.
 17. Luschnitz J., Siepchen B., Schaffner J., et al. CdTe thin film solar cells: Interrelation of nucleation, structure, and performance // *Thin Solid Films*. — 2009. — Vol. 517, No. 7. — P. 2125–2131.
 18. Fthenakis V. Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2009. — Vol. 13, No. 9. — P. 2746–2750.
 19. Singh R. R., Painuly D., Pandey R. K. Synthesis and characterization of electrochemically deposited nanocrystalline CdTe thin films // *Materials Chemistry and Physics*. — 2009. — Vol. 116, No. 1. — P. 261–268.
 20. Shaaban E. R., Afify N., El-Taher A. Effect of film thickness on microstructure parameters and optical constants of CdTe thin films // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2009. — Vol. 482, No. 1. — P. 400–404.
 21. Салій Я. П., Фреїк Д. М., Біліна І. С., Галушак М. О. Кристалографічний та орієнтаційний характер нанокристалітів у тонкоплівкових конденсатах PbTe–Bi₂Te₃ на ситалі // *Ж. нано- електрон. фіз.* — 2015. — Т. 7, № 2. — С. 02020-1– 02020-8.
 22. Біліна І. С. Механізми структуроутворення та термоелектричні властивості парофазних конденсатів твердого розчину PbTe–Bi₂Te₃ на ситалі // *ФХТТ* — 2015. — Т. 16, № 1. — С. 83–92.
 23. Ferreira S. O., Leal F. F., Faria T. E., Oliveira J. E., Motisuke P. and Abramof E. Characterization of CdTe Thin Films Grown on Glass by Hot Wall Epitaxy // *Brazilian Journal of Physics*. — 2006. — Vol. 36, No. 2A. — P. 317–319.
 24. Волков С. В., Ковальчук Є. П., Огенко В. М., Решетняк О. В. Нанохімія, наносистеми, наноматеріали. — Київ: Наукова думка, 2008. — 423 с.
 25. Зимин С. П., Горлачев Е. С. Наноструктурированные халькогениды свинца: монография. — Ярославль: ЯрГУ, 2011. — 232 с.
 26. Кукушкин С. А., Осипов А. В. Процессы конденсации тонких пленок // *УФН*. — 1998. — Т. 168, № 10. — С. 1083–1116.
 27. Osipov A. V. Kinetic model of vapour-deposited thin film condensation: nucleation stage // *Thin Solid Films*. — 1993. — Vol. 227, No. 2. — P. 111–118.
 28. Дубровский В. Г., Цырлин Г. Э. Кинетика роста тонких пленок при зародышевом механизме формирования слоев // *ФТП*. — 2005. — Т. 39, № 11. — С. 1312–1319.
 29. Ostwald W. «Uber die Vermeintliche isometric das raten undgelben Quecksilberxyds und die oberflachenspannung fester Korper» // *Js. Physics Chemistry*. — 1900. — Vol. 34. — P. 495–503.
 30. Лифшиц И. М., Слезов В. В. О кинетике диффузионного распада пересыщенных твердых растворов // *ЖЭТФ*. — 1958. — Т. 35, № 2. — С. 479–487.
 31. Wagner C. Theorie der Alterung von Niederschlagen durch Umlösen (Ostwald Reifung) // *Zs. Electrochem*. — 1961. — В. 65, М. 7/8. — P. 581–591.
 32. Венгреневич Р. Д., Иванський Б. В., Москалюк А. В. До теорії Ліфшица-Сльозова-Вагнера. // *ФХТТ*. — 2009. — Т. 10, № 1. — С. 19–30.

LITERATURA

1. Medvedeva S. A. *Fizika i himiya soedinenij AIBVI*. — М: Mir, 1970. — 624 p.

2. Georgobiani A. N., Shejnkman M. K. Fizika soedinenij AIBVI. — M: Nauka, 1986. — 319 p.
3. Brus V. V., Ilaschuk M. I., Kovalyuk Z. D., Mar'yanchuk P. D., Ul'yanickij K. S., Grycyuk B. N. Mehanizmy tokoperenosa v anizotipnyh geteroperehodah n -TiO₂/ p -CdTe. // FTP. — 2011. — Vol. 45, No. 8. — P. 1109–1113.
4. Korbutyak D. V., Mel'nichuk S. V., Korbut E. V., Borisik M. M. Telurid kadmiyu i domishkovo-defektni stani ta detektorni vlastivosti. — K: Ivan Fedorov, 2000. — 198 p.
5. Bubnov Yu. Z., Lur'e M. S., Staros F. G., Filaretov G. A. Vakuumnoe nanesenie plenok v kvazizamknutom obeme. — L: Energiya, 1975. — 161 p.
6. Kalinkin I. N., Aleskovskij V. B., Simashkevich A. V. Epitaksial'nye sloi soedinenij AIBVI. — L: Izd-vo LGU, 1978. — 235 p.
7. Freik D. M., Gorichok I. V., Sokolov O. L., Potyak V. Yu. Tehnologichni aspekti osadzhennya plivok CdTe metodom garyachoi stinki // FHTT. — 2011. — Vol. 12, No. 1. — P. 89–94.
8. Bilevych Ye. O., Boka A. I., Darchuk L. O., Gumenjuk-Sichevska J. V. et al. Properties of CdTe thin films prepared by hot wall epitaxy // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2004. — Vol. 7, No. 2. — P. 129–132.
9. Kosyak V., Opanasyuk A. Yavischa perenesennya ta osadzhennya u razi oderzhannya plivok CdTe metodom kvazizamknenogo ob'emu // Visnik L'viv. un-tu. Seriya fizichna. — 2008. — Vol. 41. — P. 117–124.
10. Major J. D., Treharne, R. E., Phillips, L. J., & Durose, K. A low-cost non-toxic post-growth activation step for CdTe solar cells // Nature. — 2014. — Vol. 511, No. 7509. — P. 334–337.
11. Paudel N. R., Wieland K. A., Compaan A. D. Ultrathin CdS/CdTe solar cells by sputtering // Solar Energy Materials and Solar Cells. — 2012. — Vol. 105. — P. 109–112.
12. Lin T., Huang F., Liang J., Wang Y. A facile preparation route for boron-doped graphene, and its CdTe solar cell application // Energy & Environmental Science. — 2011. — Vol. 4, No. 3. — P. 862–865.
13. Gloeckler M., Sankin I., Zhao Z. CdTe solar cells at the threshold to 20 % efficiency // Photovoltaics, IEEE Journal of. — 2013. — Vol. 3, No. 4. — P. 1389–1393.
14. Colletti L. P., Stickney J. L. Optimization of the growth of CdTe thin films formed by electrochemical atomic layer epitaxy in an automated deposition system // Journal of the Electrochemical Society. — 1998. — Vol. 145, No. 10. — P. 3594–3602.
15. Moutinho H. R., Moutinho H. R., Hasoon F. S., et al. Investigation of polycrystalline CdTe thin films deposited by physical vapor deposition, close-spaced sublimation, and sputtering // Journal of Vacuum Science & Technology A. — 1995. — Vol. 13, No. 6. — P. 2877–2883.
16. Pandey S. K. Tiwari, U., Raman, R. et al. Growth of cubic and hexagonal CdTe thin films by pulsed laser deposition // Thin Solid Films. — 2005. — Vol. 473, No. 1. — P. 54–57.
17. Lusnitz J. Siepchen B., Schaffner J., et al. CdTe thin film solar cells: Interrelation of nucleation, structure, and performance // Thin Solid Films. — 2009. — Vol. 517, No.7. — P. 2125–2131.
18. Fthenakis V. Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2009. — Vol. 13, No. 9. — P. 2746–2750.
19. Singh R. R., Painuly D., Pandey R. K. Synthesis and characterization of electrochemically deposited nanocrystalline CdTe thin films // Materials Chemistry and Physics. — 2009. — Vol. 116, No.1. — P. 261–268.
20. Shaaban E. R., Afify N., El-Taher A. Effect of film thickness on microstructure parameters and optical constants of CdTe thin films // Journal of Alloys and Compounds. — 2009. — Vol. 482, No.1. — P. 400–404.
21. Salij Ya. P., Freik D. M., Bilina I. S., Galuschak M. O. Kristalografichnij ta orientacijnij karakter nanokristalitiv u tonkoplivkovih kondensatah PbTe-Bi₂Te₃ na sitali // Zh. nanoelektron. fiz. — 2015. — Vol. 7, No. 2. — P. 02020-1– 02020-8.
22. Bilina I. S. Mehanizmi strukturoutvorennya ta termoelektrichni vlastivosti parofaznih kondensativ tverdogo rozchinu PbTe-Bi₂Te₃ na sitali // FHTT — 2015. — Vol. 16, No. 1. — P. 83–92.
23. Ferreira S. O., Leal F. F, Faria T. E., Oliveira J. E., Motisuke P. and Abramof E. Characterization of CdTe Thin Films Grown on Glass by Hot Wall Epitaxy // Brazilian Journal

- of Physics. — 2006. — Vol. 36, No. 2A. — P. 317–319.
24. Volkov S. V., Koval'chuk E. P., Ogenko V. M., Reshetnyak O. V. Nanohimiya, nanosistemi, nanomateriali. — Kiiiv: Naukova dumka, 2008. — 423 p.
25. Zimin. S. P., Gorlachev E. S. Nanostrukturovanye hal'kogenidy svinca: monografiya. — Yaroslavl': YarGU, 2011. — 232 p.
26. Kukushkin S. A., Osipov A. V. Processy kondensacii tonkih plenok // UFN. — 1998. — Vol. 168, No. 10. — P. 1083–1116.
27. Osipov A. V. Kinetic model of vapour-deposited thin film condensation: nucleation stage // Thin Solid Films. — 1993. — Vol. 227, No. 2. — P. 111–118.
28. Dubrovskij V. G., Cyrlin G. E. Kinetika rosta tonkih plenok pri zarodyshevom mehanizme formirovaniya sloev // FTP. — 2005. — Vol. 39, No. 11. — P. 1312–1319.
29. Ostwald W. «Uber die Vermeintliche isometric das raten undgelben Quecksilberxyds und die oberflachenspannung fester Korper» // Js. Physics Chemistry. — 1900. — Vol. 34. — P. 495–503.
30. Lifshic I. M., Slezov V. V. O kinetike diffuzionnogo raspada peresyschennyh tverdyh rastvorov // ZhETF. — 1958. — Vol. 35, No. 2. — P. 479–487.
31. Wagner C. Theorie der Alterung von Niederschlagen durch Umlösen (Ostwald Reifung) // Zs. Electrochem. — 1961. — B. 65, M. 7/8. — P. 581–591.
32. Vengrenovich R. D., Ivans'kij B. V., Moskalyuk A. V. Do teorii Lifshica-Sl'ozova-Vagnera. // FHIT. — 2009. — Vol. 10, No. 1. — P. 19–30.

ИЗМЕНЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ БАРЬЕРОВ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК p-CdTe В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Н. Э. Алимов, С. М. Зайнолобиддинова, С. М. Отажонов,
М. М. Халилов, Д. А. Юсупова, Ш. Якубова
Ферганский Государственный Университет

Поступила в редакцию 01.02.2016

Изучены спектры тока короткого замыкания в структуре p-CdTe-SiO₂-Si в зависимости от величины внешнего воздействия. Наблюдается смещение спектров в коротковолновую область, вследствие чего в этих структурах изменяются энергии оптической активации глубокого уровня. Предлагается модель для распределения потенциала, деформирующего пространственное и энергетическое распределение носителя.

Ключевые слова: фоточувствительность, ток короткого замыкания, потенциальный барьер, фото-ЭДС, коронный разряд, электропроводность, глубокий уровень, встроенное поле.

ЗМІНЮВАННЯ ПОТЕНЦІЙНИХ БАР'ЄРІВ НИЗЬКОРОЗМІРНИХ ТОНКИХ ПЛІВОК p-CdTe В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ВПЛИВІВ

Н. Е. Алімов, С. М. Зайнолобіддінова, С. М. Отажонов,
М. М. Халілов, Д. А. Юсупова, Ш. Якубова

Вивчені спектри струму короткого замикання в структурі p-CdTe-SiO₂-Si в залежності від величини зовнішнього впливу. Спостерігається зсув спектрів у короткохвильову область, внаслідок чого в цих структурах змінюються енергії оптичної активації глибокого рівня. Пропонується модель для розподілу потенціалу, що деформує просторовий та енергетичний розподіли носія.

Ключові слова: фоточутливість, струм короткого замикання, потенційний бар'єр, фото-ЕРС, коронний розряд, електропровідність, глибокий рівень, вбудоване поле.

CHANGES OF POTENTIAL BARRIERS OF LOW-DIMENSIONAL THIN FILM p-CdTe CONDITIONS OF EXTERNAL INFLUENCES

N. Alimov, S. Zaynolobiddinova, S. Otajonov,
M. Khalilov, D. Yusupova., Sh. Yakubova

The spectors of short curcuit current in p-CdTe-SiO₂-Si structure according to the magnitude of external crown discharge in static rejime have been investigated. It`s observed the shift of spectors it the short-wave area due to the energy of optic activation of deep level has changed. The model for the distribution of spatial deformulating potential and energetic distribution of carriers is offered.

Keywords: photosensitivity, short circuit current, potential barrier, the photo-emf, corona discharge, electric conductivity deeper level, built-in field.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие микро- и нанoeлектроники, новых технологических возможностей изготовления сложных твердотельных низкоразмерных структур, стимулируют разработки новых неразрушающих диагностических методов. Создание оригинальных оптоэлектронных устройств стимулирует дальнейшее изучение новых

оптических и фотоэлектрических явлений в активных пленочных элементах.

Полупроводниковые плёнки CdTe являются важным материалом для создания фотоприёмных устройств на основе их гетероструктур, работающих в ближнем (0,4–3 мкм) и дальнем (8–14 мкм) инфракрасных диапазонах. Актуальной является также проблема получения гетероструктур на

основе фоточувствительных слоев со слоями разного типа проводимости и зонной структурой в процессе выращивания высокотемпературным термическим испарением. В частности, перспективной примесью для получения материала р-типа является серебро и медь.

Цель данной работы заключается в исследовании внутренней структуры и новых фотоэлектрических свойств активных тонких плёнок и их гетероструктур в условиях внешних воздействий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе изучены низкоразмерные (размеры кристаллических зерен составляет 0,05–0,1 мкм) тонкие пленки р-CdTe полученные на SiO₂-Si. Разработана технология получения тонких пленок и пленочных структур на основе CdTe и установлены оптимальные параметры технологии получения этих пленочных элементов [1]. Полупроводниковый материал CdTe и примеси Ag, Cu наносились в вакууме 10⁻⁵ мм рт. ст. из отдельного алундового тигля на окисленную поверхность кремния легированную бором, прогретую до 500–520 К, толщина плёнок составляла 1,0–2,0 мкм, а скорость напыления CdTe 2,0 нм/с.

Известно, что в процессе выращивания плёнки CdTe примеси серебра и меди встраиваются в объем растущей плёнки в виде комплексов, имеющих акцепторные свойства [2].

При изучении спектров тока короткого замыкания ($I_{кз}$) структуры CdTe-SiO₂-Si в зависимости от величины внешнего коронного разряда в статическом режиме наблюдается смещение спектров в коротковолновую область (рис. 1).

Следует отметить, что при коронном разряде наблюдается явное изменение энергии активации глубокого уровня (0,7 эВ, 1,15 эВ) в зависимости от потенциала коронного разряда. Это свидетельствует, что уровень находится в области объемного заряда, у слоя SiO₂ и проникающее сильное поле встроенного заряда приводит к эффекту Пула-Френкеля — изменению энергии оптической активации глубокого уровня.

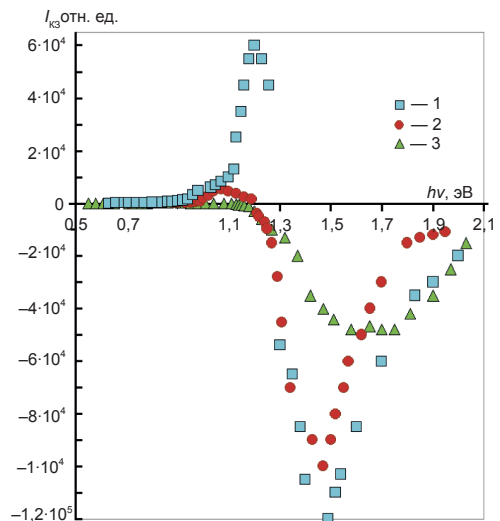


Рис. 1. Спектральные зависимости $I_{кз}$ для структуры CdTe-SiO₂-Si от величины потенциала коронного разряда: $\phi_{кр} = 80$ В (кривая 1), 50 В (2), 0 В (3)

По нашим оценкам напряженность электрического поля в окрестности дефекта имеет значение $E = 10^5$ В/см. При помощи оценки по классической формуле

$$\Delta W = e\sqrt{eE} / \sqrt{4\pi\epsilon\epsilon_0},$$

где ΔW — энергетическое смещение уровня, E — напряжённость электрического поля в окрестности дефекта, ϵ — диэлектрическая проницаемость CdTe, ϵ_0 — электрическая постоянная, e — заряд электрона.

Ситуация, возникающая в пленке CdTe на базе структуры CdTe-SiO₂-Si под действием встроенного электрического поля в диэлектрике, соответствует модели, разработанной для поликремневого полевого транзистора (см., например, Алимов Н. Э., [3]). Предлагаемая здесь модель аналогична модели [3], если формально идентифицировать слой SiO₂-Si с управляющим электродом полевого транзистора (рис. 2б). Поэтому проведенные ранее численные расчеты для распределения потенциала в поликристаллическом полупроводнике вполне применимы для встроенного заряда пленки CdTe. Из результатов, расчета воздействия внешнего электрического поля на потенциальный рельеф поликристаллической структуры следует, что слабое поле только деформирует пространственное и энергетическое распределения носителей, а сильное — приводит к уменьшению высоты межкристаллических

потенциальных барьеров, за счет перекрытия волновых функций электронов соседних кристаллитов в электрическом поле (т. е. как бы за счет объединения объема кристаллита). Эти рассуждения и результаты наших экспериментов показывают, что встроенное поле в диэлектрике SiO₂ может привести к уменьшению высоты потенциального барьера в пленке (при φ_{кр} < 30 В), а в некоторых случаях к исчезновению его (φ_{кр} > 100 В) в одной из ее приповерхностной области, например, тыловой области, и тогда становится преобладающим оставшийся потенциальный барьер в другой — противоположной ее приповерхностной области.

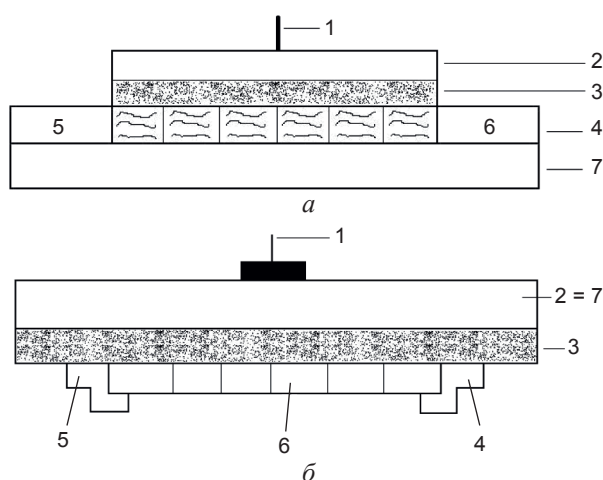


Рис. 2. Поликристаллическая структура на основе кремния (а) [2] и CdTe-пленок (б); а: 1, 2 — управляющий электрод, 3 — SiO₂, 4 — Si, 5 — сток, 6 — исток, 7 — изолятор; б: 1 — управляющий электрод, 2 — Si, 3 — SiO₂, 4 — исток, 5 — сток, 6 — CdTe

Описанная здесь модель качественно хорошо отражает основные особенности кривых на рис. 1. Действительно, если считать, что знаки асимметрии потенциальных барьеров у фронтальной и тыловой приповерхностных областях разные, то вполне естественным является наблюдение инверсии знака $I_{кз}$ в зависимости от эффективной глубины поглощения возбуждающего света.

Включение внешнего коронного разряда в статическом режиме в структуре CdTe-SiO₂-Si подавляет генерации фото-ЭДС в одной из двух противоборствующих систем потенциальных барьеров. Так, в соответствии с кривыми на рис. 1. наблюдается сначала смещение области инверсии знака $I_{кз}$, а затем полное исчезновение ее с ростом напряженности приложенного коронного разряда.

Из результатов расчета (рис. 3 а, б) воздействие внешнего поля на поликристаллическую структуру SiO₂-Si видно, что слабое (а) поле только деформирует распределение носителей, а сильное (б) приводит к уменьшению величины межкристаллических барьеров, за счет обеднения объема кристаллита. Эти результаты показывают, что встроенное поле может привести к исчезновению барьеров в пленке (одной ее поверхности), и тогда становится преобладающим оставшийся барьер. Наиболее наглядно эта ситуация видна на рис. 1, на котором явно выражается изменение спектрального распределения фотоЭДС и исчезает источник фотоЭДС, приводящий к инверсии знака сигнала с увеличением приложенного коронного разряда.

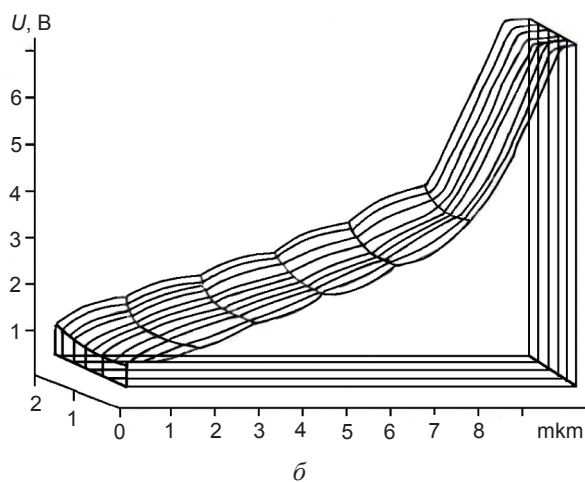
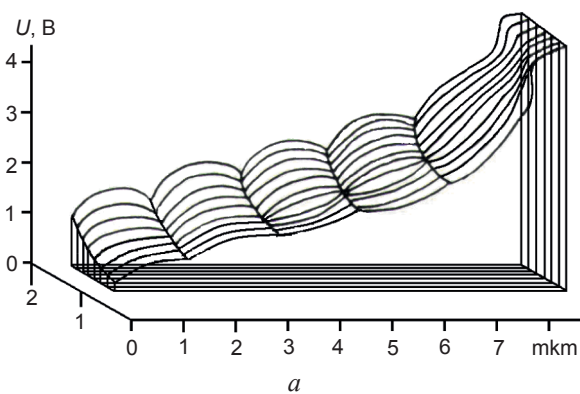


Рис. 3. Модель, разработанная для полукремниевого полевого транзистора [3]

Поля, соответствуют модели, разработанной для полукремниевого полевого транзистора [3]. Проведенные численные расчеты распределения потенциала в поликристаллическом полупроводнике вполне применимы для встроенного заряда пленки.

Используем уравнение Пуассона

$$\operatorname{div}(\epsilon_s \operatorname{grad} \phi) = -g(p - n + N_D^+ - N_A^-) \times (1) \\ \times Q_{it} \delta(\vec{r} - \vec{r}_i),$$

и уравнения непрерывности носителей для электронов и дырок соответственно

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \operatorname{div}(J_n / q) = (G - R) + (G - R)_i \delta(r - r_i), \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \operatorname{div}(J_p / q) = (G - R) + (G - R)_i \delta(r - r_i), \quad (3)$$

где ϕ — электрический потенциал, n и p — концентрация электронов и дырок соответственно, Q_{it} — плотность захваченного заряда на единицу площади; r_i обозначает области межфазной границы, J_n и J_p — плотности тока электронов и дырок соответственно, $(G - R)$ — чистая суммарная скорость генерации на единицу объема, и $(G - R)_i$ — суммарная скорость рекомбинации на единицу площади.

Плотности токов рассчитываются посредством обычных уравнений дрейфовой диффузии

$$J_n = -q\mu_n n \operatorname{grad}(\phi + \Delta\phi_c) + qD_n \operatorname{grad}n, \quad (4)$$

$$J_p = -q\mu_p p \operatorname{grad}(\phi + \Delta\phi_v) - qD_p \operatorname{grad}p, \quad (5)$$

где μ_n и μ_p — подвижности электронов и дырок, D_n и D_p — коэффициенты диффузии электронов и дырок, относящиеся к подвижностям по соотношению Эйнштейна, и $\Delta\phi_c$, $\Delta\phi_v$ представляют энергетический сдвиг зоны проводимости. Если сужением ширины запрещенной зоны пренебрегается, то $\Delta\phi_c = \Delta\phi_v = 0$, и сила, действующая на носители, вызывается только электрическим полем. В (1) захваченный заряд Q_{it} представлен как

$$Q_{it} = -qN_{it} \frac{S_n n + S_p n_1}{S_n (n + n_1) + S_p (p + p_1)}, \quad (6)$$

если состояния акцепторного типа, и как

$$Q_{it} = qN_{it} \frac{S_n n + S_p p}{S_n (n + n_1) + S_p (p + p_1)} \quad (7)$$

для донорных межфазных состояний. Суммарная скорость генерации на единицу площади $(G - R)_i$ равна

$$(G - R)_i = \frac{n_{ie}^2 - np}{(n + n_1) / S_p + (p + p_1) / S_n},$$

где S_n , S_p — скорости поверхности рекомбинации выражены как $S_n = \delta_n v_{th} N_{it}$; N_{it} — обозначает плотность межфазных состояний, δ_n и δ_p — сечения захвата, v_{th} — тепловая скорость носителей и n_1 , p_1 определены как

$$n_1 = n_{ie} \exp[(E_t - E_i) / kT],$$

$$p_1 = n_{ie} \exp[(E_i - E_t) / kT],$$

где E_i — собственный уровень Ферми i -типа и E_t — энергия ловушки.

Проведенные численные расчёты распределения потенциала в поликристаллических полупроводниках SiO₂-Si применимы для качественного анализа поведения барьеров в поле встроенного заряда плёнки CdTe.

Анализ поведения барьеров в поле встроенного заряда плёнки CdTe будет приведен во второй части работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

а) При легировании CdTe серебром или медью наблюдается небольшое увеличение концентрации электронов и удельной электропроводности, которые приводят к увеличению мощности пленки и тока.

б) Из анализа экспериментальных результатов следует, что слабое внешнее поле деформирует распределение носителей, а сильное приводит к уменьшению величины межкристаллических барьеров, при этом встроенное поле управляет поликристаллическими барьерами, расположенными между кристаллитами, вследствие чего изменяются энергии оптической активации глубокого уровня.

в) При коронном разряде наблюдалось явное изменение энергии активации глубокого уровня, которое объясняется эффектом Пула-Френкеля — изменением энергии оптической активации глубокого уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отажонов С. М. // Физическая инженерия поверхности. — 2009. — Т. 2, № 1–2. — С. 28–31.
2. Вайткус Ю. Ю., Расулов Р. Я., Отажонов С. М., Орипов У. // «Поверхность» Рентгеновские синхронные и нейтронные исследования АН Россия. — Москва: «Наука». — 1999. — № 3. — С. 44–49.
3. Guerrieri R., Ciampolini P., Gnidi A., Rudan M., Baccarani G. // JEEE Transactions on Electron Devices. — 1986. — Vol. ED-33, No. 8. — P. 1201–1206.

LITERATURA

1. Otazhonov S. M. // Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. — 2009. — Vol. 2, No. 1–2. — P. 28–31.
2. Vajtkus Yu. Yu., Rasulov R. Ya., Otazhonov S. M., Oripov U. // «Poverhnost» Rentgenovskie sinhronnye i nejtronnye issledovaniya AN Rossiya. — Moskva.: «Nauka». — 1999. — No. 3. — P. 44–49.
3. Guerrieri R., Ciampolini P., Gnidi A., Rudan M., Baccarani G. // JEEE Transactions on Electron Devices. — 1986. — Vol. ED-33, No. 8. — P. 1201–1206.

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВЫСОКОДОЗНОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ТИТАНА В МОНОКРИСТАЛЛЫ Cu

А. Д. Погребняк, Аид Куссей Джаруллах
*Сумской государственной университет,
Сумы, Украина*

Поступила в редакцию 11. 02. 2016

Приведены результаты экспериментальных исследований профилей раздела концентрации внедренных ионов и попутных примесей по глубине поверхности монокристаллов меди в результате высокодозной имплантации ионами титана. Установлено, что в результате воздействия ионами титана вблизи поверхности формируются тонкие аморфные углеродные и окисленные пленки, а также карбид титана.

Ключевые слова: ионная имплантация, ионы титана, аморфные пленки, карбид титана.

СТРУКТУРНО-ФАЗОВИЙ СТАН ПОВЕРХНІ ПРИ ВИСОКОДОЗНІЙ ІОННІЙ ІМПЛАНТАЦІЇ ТИТАНУ В МОНОКРИСТАЛИ Cu

О. Д. Погребняк, Аид Куссей Джаруллах

Наведені результати експериментальних досліджень профілів розділу концентрації впроваджених іонів і попутних домішок за глибиною поверхні монокристалів міді в результаті високодозної імплантації іонами титану. Встановлено, що в результаті впливу іонами титану поблизу поверхні формуються тонкі аморфні вуглецеві і окислені плівки, а також карбід титану.

Ключові слова: іонна імплантація, іони титану, аморфні плівки, карбід титану.

STRUCTURAL AND PHASE SURFACE STATE AT HIGH ION IMPLANTATION OF Ti IN Cu SINGLE CRYSTALS

A. D. Pogrebjak, Ayd Kussey Jarullah

The results of experimental research of the concentration interface profiles of the implanted ions and the co product impurities over the depth of the surface of copper single crystals as a result of high-dose implantation of titanium ions are shown. It is found that thin amorphous carbon and oxidized films and titanium carbide are formed close to the surface as a result of titanium ions impact.

Keywords: ion implantation, titanium ions, amorphous films, titanium carbide.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной техники приводит к необходимости создания материалов, работающих в экстремальных условиях высоких температур и больших механических нагрузок. Одним из методов модификации внутренней структуры и, как следствие, эксплуатационных свойств защитных покрытий является воздействие на них ионизирующего излучения (бомбардировка заряженными частицами) [1–5]. При таких воздействиях происходит быстрый разогрев поверхности металлов и сплавов, обладающей различной внутренней архитектурой, что приводит к существенным структурно-фазовым изменениям поверхностного слоя, а именно формированию нанодисперсных

выделений, метастабильных фаз, образованию областей с повышенной концентрацией дефектов и прочее. [6]. В отличие от традиционных методов ионная имплантация позволяет легировать материал различными химическими элементами в различных концентрациях, что позволяет получить материал, обладающий комплексом улучшенных служебных характеристик.

Не обращая внимания на значительный прогресс в использовании высокодозной ионной имплантации для модификации поверхности и улучшения служебных характеристик металлов и сплавов, остается достаточно много вопросов, связанных с интенсивной имплантацией монокристаллов многозарядными ионами. Необходимость

изучения процессов высокодозной имплантации в монокристаллы представляет на данный момент фундаментальный и прикладной научный интерес. В первую очередь это связано, с изучением максимального проникновения ионов в матрицу при высокодозной имплантации. Это связано с интенсивным обсуждением в последнее время вопроса о, так называемом, «эффекте дальнего действия» (ЭД) при высокодозном облучении металлов и сплавов. Использование монокристаллов металлов для высокодозной имплантации, особенно при создании условий каналирования, позволяет ждать максимального пробега внедренных ионов в матрицы и оценить возможность аномального массопереноса [7–12].

Целью работы является исследование профилей раздела концентрации внедренных ионов и попутных примесей по глубине поверхности монокристаллов меди в результате высокодозной имплантации ионами титана.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Материалом для исследования влияния высокодозированной ионной имплантации на процессы модификации поверхностных особенностей были выбраны монокристаллы Cu. Исследовались образцы монокристаллов Cu, вырезанные параллельно плоскостям (111) и (100), с электрохимически

отполированными поверхностями, размерами $14 \times 14 \times 3$ мм. Полирование выполнялось в растворе 15 мл H_2CrO_4 , 90 мл H_2O и 3 капли HCl .

Ионная имплантация образцов Cu производилась на источнике «Радуга» с ускорительным напряжением 40 кВ, частота следования импульсов 50 Гц. Во время имплантации ионов Ti в Cu, контролировались такие параметры: доза облучения, температура мишени, ускоряющее напряжение и частота следования импульсов. После имплантации для некоторых образцов проводились измерения жесткости поверхности. Параметры и условия облучения образцов сведены в табл. 1.

Анализ концентрационных профилей титана проводился методом резерфордовского обратного рассеяния ионов $^4He^+$ с начальной энергией 2 МеВ. Для получения профиля атомов кислорода в приповерхностных слоях образцов использовался упругий резонанс реакции $^{16}(^4He, ^4He)^{16}O$ в районе 3,045 МеВ. Спектры регистрировались при угле $\varphi = 60^\circ$ и углом рассеивания $\theta = 170^\circ$. Концентрационные глубинные профили элементов были получены при обработке спектров с использованием программы Simnra.

Для изучения фазового состава и дефектной структуры образцов монокристаллов Cu проводились электронно-микроскопические исследования с использованием микродифракции.

Таблица 1

Параметры и условия облучения

№ п/п	Тип иона	Доза, ион/см ⁻²	Температура во время облучения, °С	Ток пучка, мА	Материал	Неординарность поверхности, мкм
1	Ti	5×10^{16}	50	1,5–2	Cu (111), (100)	0,1 + 0,05
2	Ti	8×10^{16}	50	2–2,2	Cu (111), (100)	–
3	Ti	1×10^{17}	80	2–2,2	Cu (111), (100)	–
4	Ti	5×10^{16}	1000	4,2	Cu (111), (100)	–
5	Ti	8×10^{16}	150	4,5	Cu (111), (100)	–

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 изображен один из серии энергетических спектров обратного рассеяния ионов ${}^4\text{He}^+$, измеренный для образца Cu (111) имплантированного Ti дозой 8×10^{17} ион/см². В высокоэнергетической части спектра наблюдается характерное «выедание», обусловленное наличием внедренных ионов Ti в матрице Cu. В спектре наблюдается два пика, а именно, первый пик (в районе 660 канала) относится к выходу ионов гелия, рассеянных на атомах имплантированного титана. Второй пик (в районе 320 канала) — к резонансному выходу ионов гелия, рассеянных на кислороде, который находится в слое имплантированных атомов титана.

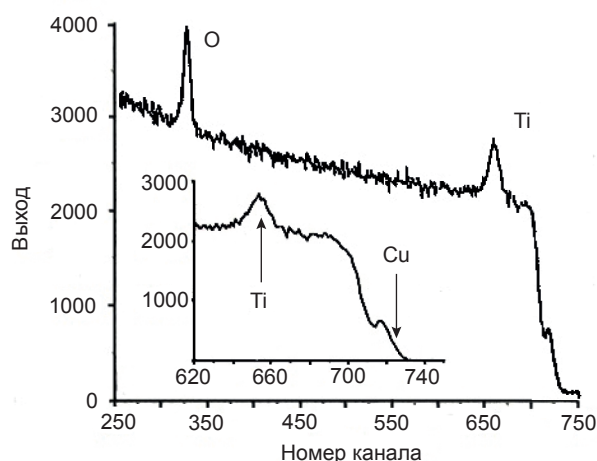


Рис. 1. Энергетический спектр обратного рассеяния ионов гелия с начальной энергией 3,052 MeV, измеренный для образцов Cu (111), имплантированных Ti дозой 8×10^{17} ион/см². На вставке обозначено высокоэнергетическую часть спектра. Стрелками обозначены кинематические границы спектров для разных элементов

Наличие кислорода в приповерхностных областях меди облученной титаном, очевидно, является суперпозицией двух процессов. Первый — внедрение кислорода за счет диссоциации и следующей ионизации кислородо-содержащих молекул вакуумной атмосферы камеры ускорителя. Второй процесс — ионно-лучевое перемешивание начальной кислородной пленки (которая присутствует на необлученных образцах Cu) с медной матрицей при имплантации титаном. При этом, процесс проникновения кислорода в поверхность меди в результате ее высокого окисления является преобладающим.

На рис. 2 приведены профили распределения концентрации атомов Ti по глубине в монокристалле Cu(111) для разных доз облучения. Видно, что увеличение дозы облучения приводит к увеличению концентрации титана в поверхности меди. При этом наблюдается смещение пика концентрации титана в глубину от облученной поверхности по мере увеличения дозы имплантации. Смещение пика концентрации Ti в глубину от имплантированной поверхности монокристалла меди, очевидно, связано с экранированием эффекта распыления матрицы за счет создания на поверхности меди окисленной и аморфной углеродной пленок, которые исполняют защитную роль. Очевидно, это связано с тем, что тонкая окисленная и аморфная углеродная пленка, которая создается в процессе ионной имплантации на поверхности Cu за счет наличия углерода и кислорода в остаточной атмосфере камеры ускорителя, играет роль буфера и исполняет защитные функции от эффекта распыления подложки.

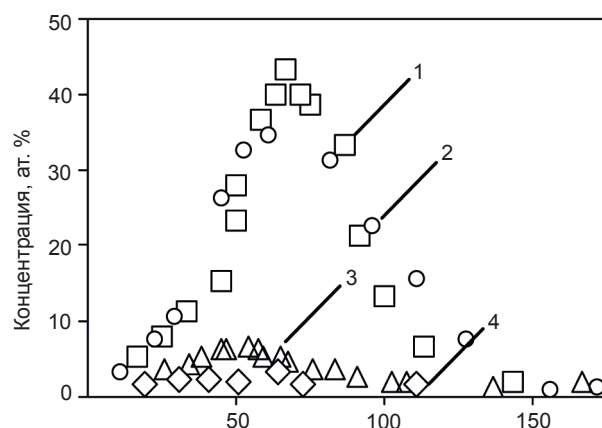


Рис. 2. Концентрационные глубинные профили титана в монокристалле меди при разных дозах имплантации по направлению оси Cu(111): 1 — доза 8×10^{17} ион/см²; 2 — 5×10^{17} ион/см²; 3 — 8×10^{16} ион/см²; 4 — 5×10^{16} ион/см²

Стоит отметить, что характер профилей распределения внедренных ионов Ti в поверхность Cu(100) для разных доз облучения практически не отличаются от случая имплантации в поверхность Cu(111) при тех же дозах облучения (рис. 2). Это свидетельствует о том, что ориентация монокристаллов Cu в случае имплантации титаном (который является тяжелой примесью) практически не влияет на процессы формирования

глубинных профилей распределения имплантированной примеси.

В отличие от случая внедрения Ti при имплантации монокристаллов меди, профили распределения внедренного кислорода значительно зависят от кристаллографической ориентации поверхности. Так, например, профили концентрации кислорода имеют разные максимумы для разных ориентаций при разных дозах имплантации монокристаллов меди титаном. В случае облучения Cu(100) максимальная концентрация кислорода наблюдается при дозе имплантации 5×10^{17} ион/см², а в случае имплантации Cu(111) — при дозе 8×10^{17} ион/см² (см. рис. 3). Этот факт, возможно, обусловлен разным составом кислорода в окисленной пленке и разной толщиной этой пленки в начальных образцах монокристаллов меди с разной ориентацией поверхности.

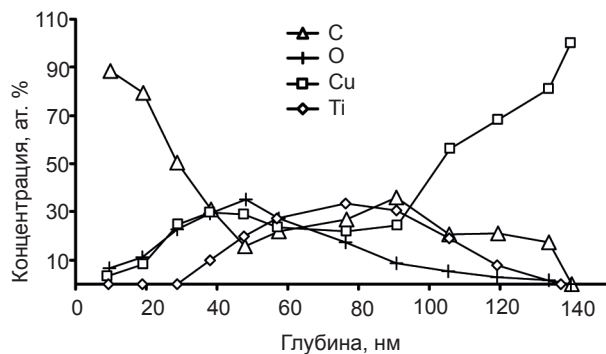


Рис. 3. Концентрационные глубинные профили O, Ti, C в поверхностном слое после имплантации Ti в Cu (111) дозой 8×10^{17} ион/см²

На рис. 3 и рис. 4 приведены профили распределения концентрации титана, кислорода и углерода по глубине поверхности монокристаллов Cu с ориентацией (111) после высокодозной ионной имплантации Ti с дозой 8×10^{17} и 5×10^{17} ион/см², относительно.

Экспериментальные результаты однозначно свидетельствуют о том, что имплантация Ti с плазмы ионного источника сопровождается внедрением углерода и кислорода с остаточной атмосферы камеры ускорителя. Пик с концентрацией кислорода 25–30 ат. % на глубинах до 50 нм и высокое его содержание в слое толщиной до 100 нм для обеих доз имплантации

(рис. 3 и рис. 4), очевидно связан с его внедрением и перемешиванием в процессе имплантации меди титаном начальной окисленной пленки на поверхности с подложкой.

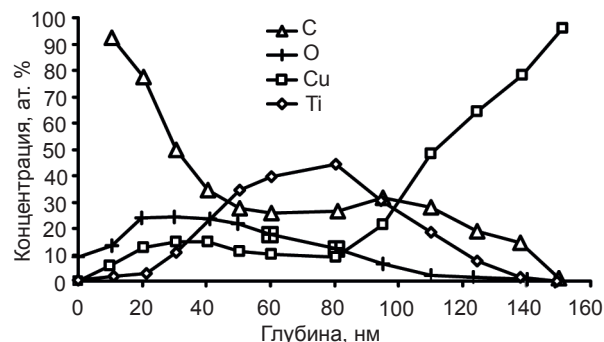


Рис. 4. Концентрационные глубинные профили O, Ti, C в поверхностном слое после имплантации Ti в Cu (111) дозой 5×10^{17} ион/см²

С приведенных выше рисунков также следует, что концентрация углерода на поверхности облученной меди может составлять величину до 100 ат. %, что, по-видимому, свидетельствует об образовании на имплантированной поверхности меди тонкой аморфной углеродной пленки. При этом пленка присутствует при обеих дозах облучения. Другими словами процесс распыления углеродной пленки в процессе облучения сопровождается непрерывающимся процессом создания ее новых слоев. При этом при имплантации титаном распыляется не столько сама медная подложка, а главным образом снова нарастающая аморфная прослойка углеродной пленки.

Следует обозначить (см. рис. 3 и рис. 4), что в облученной титаном поверхности Cu наблюдаются значительные концентрации углерода (до 10 ат. %) до глубины около 150 нм. Это, очевидно, связано с имплантацией углерода с остаточной атмосферы и с перемешиванием (частично, которая остается после распыления) углеродной пленки с медной матрицей. Факт внедрения углерода на большие глубины, особенно при имплантации карбидосоздающими элементами или в матрице с карбидосоздающих элементов играет важную роль в формировании структуры, фазового и элементного состава и, относительно, свойств облученной поверхности.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что высокодозная ионная имплантация монокристаллов меди ионами титана, кроме внедрения Ti сопровождается имплантацией углерода и кислорода с остаточной вакуумной атмосферы ускорителя, что приводит к созданию тонкой аморфной углеродной и окисленной пленок вблизи поверхности и карбидов титана в приповерхностных слоях.
2. Показано, что тонкие окисленная и аморфная углеродная пленки, которые постоянно создаются на поверхности в процессе имплантации титаном образцов меди, снижают эффект распыления медной матрицы, обуславливая, тем самым, смещения профиля распределения имплантированного титана на глубину от имплантированной поверхности по мере повышения дозы имплантации. При этом максимальная глубина проникновения имплантированного титана в медную матрицу даже при высоких дозах имплантации (8×10^{17} ион/см²) не превышает 1,3 мкм.

REFERENCES

1. Nikitin A. A., Travina N. T., Guseva M. I. et al. Structural and phase transitions and B⁺ and C⁺ distribution profiles in implanted steels // *Surface. Physics, chemistry, mechanics.* — 1989. — Vol. 3. — 21 p.
2. Pout G. M., Foti G., Jacobson D. K. Surface modification and alloying by laser, ion, and electron beams. — M.: Mashinostroenie, 1987. — 443 p.
3. Guseva M. I. Ion implantation in metals // *Surface. Physics, chemistry, mechanics.* — 1986. — Vol. 2. — P. 27–50.
4. Vladimirov B. G., Guseva M. I., Fedorov A. V. et al. Investigation of properties of ion-implanted steels // *Surface. Physics, chemistry, mechanics.* — 1983. — Vol. 7. — P. 123–128.
5. Komarov F. F. Ion implantation in metals. — M.: Metallurgy, 1990. — 216 p.
6. Bely A. V., Kukareko V. A., Lobodaeva O. V. Phase and structural transitions in iron and its alloys at ion implantation // *The physics of metals and metallography.* — 1995. — Vol. 80. — P. 82–95.
7. Buryankov A. F., Komarov F. F., Fedotov S. A. Deep distribution of impurity at ion implantation with formation of stable phases // *Surface.* — 1990. — No. 5. — P. 75–80.
8. Aymakov M. Sh., Zhetbayev A. K., Kardyzhanov K. K. Phase formation in iron, implanted with ions of nitrogen and carbon // *Surface.* — 1988. — No. 10. — P. 134–137.
9. Pogrebnjak A. D., Sharkeev Yu. P., Lychaghin D. V. et al. Relation of mechanical and frictional properties to defects in high power ion beam irradiated α -Fe // *Phys. Letters A.* — 1989. — Vol. 141, No. 3–4. — P. 204–206.
10. Pogrebnjak A. D., Duvanov S. M., Mikhailov A. D. et al. Surface and near surface structure and composition of high-dose implanted and electron beam annealed single crystal copper // *Surf. Coat. Technol.* — 1997. — Vol. 89. — P. 90–96.
11. Shulov V. A., Remnev G. Ye., Kascheev V. N. et al. Influence of ion and beam processing by high power pulse beams on physical and chemical state of the surface layers and on fatigue strength of EP718I alloy // *Physics and Chemistry of Materials Treatment.* — 1992. — No. 6. — P. 28–35.
12. Pogrebnjak A. D., Shantyr R. I., Kul'ment'eva O. P. Modification and mixing multilayer systems by means of a high-power ion beam // *Vacuum.* — 2002. — Vol. 67. — P. 243–248.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДЕННЫХ ИЗ ФИЛЬТРОВАННОЙ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОШКОВОГО КАТОДА $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$

В. В. Васильев¹, А. А. Лучанинов¹, Е. Н. Решетняк¹, В. Е. Стрельницкий¹,
Г. Н. Толмачева¹, Г. А. Прибытков², В. В. Коржова²

¹Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
г. Харьков, Украина,

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 01.02.2016

Методом вакуумно-дугового осаждения из фильтрованной плазмы с использованием порошкового $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$ катода синтезированы нитридные покрытия системы CrAlN с высокой твердостью (30–36) ГПа, шероховатостью поверхности на уровне (40–50) нм, низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью, что позволяет рекомендовать их в качестве защитных покрытий. Катодный материал изготовлен горячим прессованием смесей порошков хрома и алюминия, исследованы его структура и фазовый состав. Катодные заготовки имеют структуру металло-матричного композита с пористостью не более 3–4 %, с прочностью и пластичностью достаточной для изготовления катодов металлообработкой резанием.

Ключевые слова: вакуумно-дуговое осаждение, порошковый катод, фильтрованная плазма, нитридные покрытия, твердость.

СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ НІТРИДНИХ ПОКРИТТІВ, ОСАДЖЕНИХ З ФІЛЬТРОВАНОЇ ВАКУУМНО-ДУГОВОЇ ПЛАЗМИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПОРОШКОВОГО КАТОДУ $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$

В. В. Васильєв, О. А. Лучанінов, О. М. Решетняк, В. Є. Стрельницький,
Г. М. Толмачова, Г. А. Прибитков, В. В. Коржова

Методом вакуумно-дугового осадження з фільтрованої плазми із застосуванням порошкового $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$ катоду синтезовані нітридні покриття системи CrAlN з високою твердістю (30–36) ГПа, шорсткістю поверхні на рівні (40–50) нм і з низьким коефіцієнтом тертя та високою зносостійкістю, що дозволяє рекомендувати ці покриття як захисні. Катодний матеріал виготовлений гарячим пресуванням сумішей порошків хрому й алюмінію; досліджені його структура і фазовий склад. Катодні заготовки мають структуру метало-матричного композиту з пористістю, яка не перевищує 3–4 %, з міцністю і пластичністю достатньою для виготовлення катодів металообробкою різанням.

Ключові слова: вакуумно-дугове осадження, порошkový катод, фільтрована плазма, нітридні покриття, твердість.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF NITRIDE COATINGS DEPOSITED FROM FILTERED VACUUM ARC PLASMA GENERATED BY EVAPORATION OF CHROMIUM–ALUMINUM POWDER CATHODE

V. V. Vasylyev, A. A. Luchaninov, E. N. Reshetnyak, V. E. Strel'nitskij,
G. N. Tolmacheva, G. A. Pribytkov, V. V. Korzhova

CrAlN coatings were synthesized by filtered vacuum-arc deposition method using the powder $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$ cathode. High hardness (30–36) GPa, low roughness of (40–50) nm, low friction coefficient and high wear durability enable use of these coatings as protective ones. The cathode material was made by hot compaction of chromium and aluminum powder mixtures, its structure and phase composition have been investigated. Hot compacted cathode blank have a structure of aluminum matrix composite of minimal (3–4 %) porosity, whose strength and plasticity is apt to be machined for fabrication the cathode.

Keywords: vacuum-arc deposition, powder cathode, filtered plasma, nitride coatings, hardness.

ВВЕДЕНИЕ

Покрyтия на основе нитрида хрома имеют хорошие механические свойства (твердость, износостойкость), а также высокую стойкость к коррозии и окислению [1]. Эти свойства способствуют широкому их применению в качестве защитных покрытий на режущем инструменте и на деталях машин. Так, в автомобильной промышленности такие покрытия наносят на клапаны, толкатели и распределительные валы. Они эффективны также для защиты режущего и формовочного инструмента, особенно в случае обработки пластмасс [2]. Добавка алюминия позволяет существенно повысить жаростойкость при сохранении высокой твердости.

Начало разработки CrAlN покрытий для технических применений приходится на 90-е годы предыдущего столетия [3, 4]. Первые покрытия были получены методом магнетронного напыления, в дальнейшем применяли и другие методы, в частности вакуумно-дуговой. Сейчас на рынке представлены CrAlN покрытия. Так, фирма Oerlikon Balzers разработала жаростойкие покрытия на основе CrAlN с торговой маркой BALINIT® [5]. Твердость заявленных покрытий составляет 32–33 ГПа, коэффициент трения по стали 0,35, максимальная рабочая температура +1100 °С. В результате исследований были найдены соотношения концентраций элементов, при которых формируется кубическая кристаллическая структура типа NaCl, при которой покрытия имеют высокие механические характеристики, а также жаростойкость [6, 9, 10, 11]. Теоретическое рассмотрение [6] предсказывает диапазон существования кубической фазы в $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ при $x \leq 0,48-0,75$ зависимости от характера распределения атомов Al в решетке.

Увеличение твердости CrAlN за счет введения в состав алюминия связывают с усилением межатомных связей в кристаллической решетке [6]. Улучшение устойчивости к окислению обусловлено тем, что согласно [9] в результате окислительных процессов на поверхности покрытия формируется псевдобинарный смешанный CrAlO слой со структурой корунда, который замедляет диффузию кислорода

и препятствует дальнейшему окислению. Анализ литературных данных показывает, что при низком содержании Al устойчивость CrAlN к высокотемпературному окислению снижается. Повышение содержания алюминия способствует повышению твердости, однако при этом стабильность твердого раствора ухудшается, а при содержании Al > 70 % возможно выделение вюрцитной фазы, что приводит к уменьшению твердости. С учетом этого в наших экспериментах в вакуумно-дуговом источнике фильтрованной плазмы использовались катоды, содержащие 50 ат. % алюминия и 50 ат. % хрома. Подобные катоды в настоящее время предлагаются на рынке. Так фирма Plansee [23] производит методом порошковой металлургии катоды AlCr состава 70/30 и 50/50 ат. % с размером зерен 100/50 мкм.

Такой подход мотивирован тем, что для получения плазмы сложного состава целесообразно использовать один многокомпонентный катод с необходимой концентрацией всех элементов, которые при испарении переходят в объем покрытия.

Метод осаждения с периодической имплантацией в покрытие ускоренных ионов из контактирующей с подложкой плазмы (PPI&D) довольно часто применяют для нанесения PVD покрытий [15–18]. В этом методе имплантация в покрытие ускоренных ионов происходит в течение длительности импульсов потенциала смещения отрицательной полярности амплитудой от нескольких сотен до нескольких тысяч вольт, которые подаются на подложку с определенной частотой. В промежутках между импульсами происходит осаждение покрытия, при этом поверхность покрытия распыляется значительно меньше, чем в случае осаждения при постоянном высоком потенциале подложки, но в полной мере сохраняются эффекты, связанные с бомбардировкой ионами повышенной энергии, что позволяет варьируя параметры импульсов воздействовать на структуру покрытия, уровень остаточных напряжений и другие его свойства [19].

Осажденные методом PPI&D вакуумно-дуговые покрытия на основе TiN и TiAlN подробно исследованы в работах [24–29]. Установлены зависимости структуры

и механических свойств покрытий от параметров импульсного потенциала, которые позволяют формировать качественные наноструктурные нитридные покрытия на основе TiN и TiAlN.

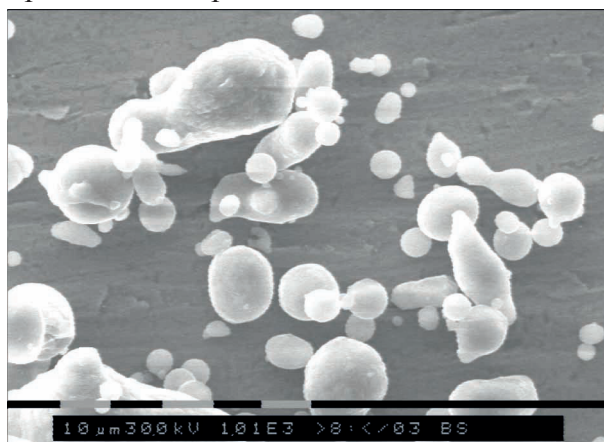
Целью данной работы являлось экспериментальное изучение процессов осаждения нитридных покрытий из фильтрованной плазмы вакуумно-дугового источника с порошковым катодом CrAl при подаче высоковольтного импульсного потенциала смещения на подложку и свойств CrAlN покрытий. На первом этапе исследования был отработан способ изготовления катодов состава $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$, пригодных для использования в вакуумно-дуговых технологиях. Затем были исследованы процессы синтеза, структура и свойства вакуумно-дуговых CrAlN покрытий, синтезированных с использованием таких катодов.

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ГОРЯЧЕПРЕССОВАННЫХ КАТОДОВ CrAl

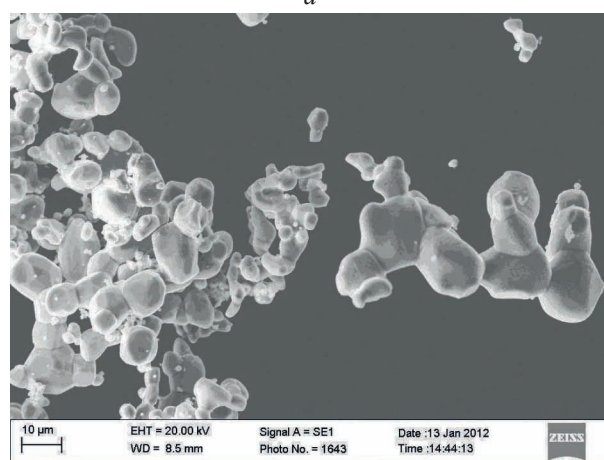
Заготовки для изготовления катодов диаметром 60 мм получали горячим прессованием порошковых смесей хрома марки ПХ1М (фракция < 50 мкм) и алюминия марки ПА-4 в состоянии поставки (85 % < 100 мкм согласно ТУ поставщика). Смеси имели эквиатомный состав $\text{Al}_{50}\text{Cr}_{50}$. Морфология исходных порошков показана на рис. 1. Частицы алюминиевого порошка, полученного распылением расплава, представляют собой закристаллизовавшиеся капли округлой формы различных размеров (рис. 1а). Форма мелких частиц близка к сферической, более крупные в большинстве имеют вытянутую форму. Мелкую фракцию порошка хрома получали ситовым отсевом после помола в вибромельнице порошка хрома марки ПХ1М.

Особенностью двойной диаграммы CrAl является присутствие множества промежуточных соединений (алюминидов хрома). Поэтому температуру горячего прессования выбирали с таким расчетом, чтобы она не превышала температуры начала активного взаимодействия на границах разнородных частиц с образованием твердых и хрупких алюминидов хрома. При

соблюдении этого условия удалось получить прессовки с пористостью 3–4 %.



а



б

Рис. 1. Морфология исходных порошков: а — алюминий; б — хром

Типичный вид микроструктуры горячепрессованных порошковых композиций представлен на рис. 2. После горячего

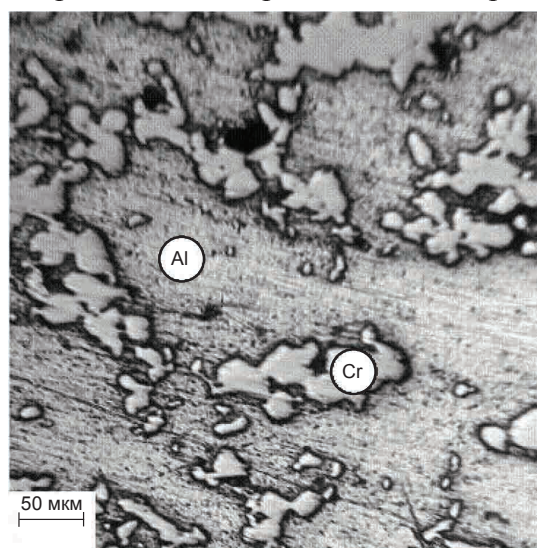


Рис. 2. Микроструктура горячепрессованных заготовок из порошковых смесей алюминия и хрома (шлиф не травлен)

прессования микроструктура композита представляет собой алюминиевую матрицу с включениями частиц хрома. Встречаются немногочисленные поры, сосредоточенные преимущественно на границах включений с алюминиевой матрицей. Других структурных составляющих при металлографическом исследовании не выявлено.

Результаты металлографии подтверждаются рентгенограммами образцов, подвергнутых горячему прессованию (рис. 3). Все линии на рентгенограммах принадлежат компонентам порошковых смесей: алюминию и хрому.

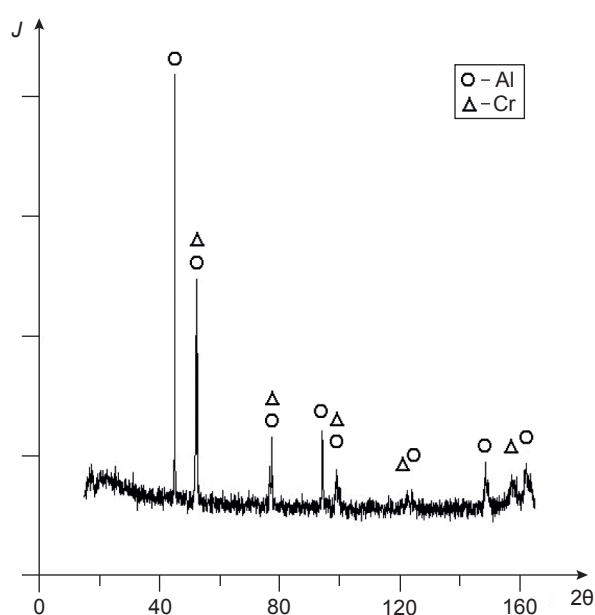


Рис. 3. Рентгенограммы прессовок из порошковых смесей алюминия и хрома

Сплошная алюминиевая матрица сформировалась путем сварки смежных частиц алюминия в процессе термосиловой обработки порошковых смесей. Несмотря на то, что надежного соединения включений хрома с алюминиевой матрицей не происходит, прочность и пластичность полученных композитов оказывается достаточной для обработки заготовок резанием при изготовлении из них катодов [30].

ОСАЖДЕНИЕ ПОКРЫТИЙ CrAlN И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

Осаждение нитридных покрытий системы CrAlN осуществлялось вакуумно-дуговым способом с использованием $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$

катодов, изготовленных методом порошковой металлургии.

Покрытия наносились на подложки из коррозионностойкой стали 12X17 размером 17×20 мм и толщиной 1,5 мм. Расстояние от выходного отверстия фильтра до образцов составляло 210 мм. Покрытия осаждались при токе дуги 100 А в условиях подачи импульсного потенциала смещения на подложку. Импульсный потенциал подавался от генератора высоковольтных импульсов с параметрами: амплитуда (U) в пределах (0,5–2,5) кВ, длительность импульсов (τ) 6 мкс, частота повторения (ν) 1,3 или 12 кГц. В промежутках между импульсами подложка находилась под потенциалом -100 В. Время осаждения покрытий составляло 30 или 60 минут.

Подача реакционного газа (азота) в вакуумную камеру осуществлялась через источник плазмы. В некоторых экспериментах для стабилизации горения вакуумно-дугового разряда дополнительно в камеру подавался аргон. Давление азота в камере менялось в интервале 0,02–0,12 Па, а парциальное давление аргона не превышало 0,03 Па.

Состав покрытий контролировался методом рентгеновского флуоресцентного анализа (РФА) на вакуумном сканирующем кристалл-дифракционном спектрометре СПРУТ. По интенсивности характеристических линий $\text{CrK}\alpha$ и $\text{AlK}\alpha$ были рассчитаны значения массовой концентрации алюминия в хроме C_{Al} (без учета азота), которые позволяют оценить степень воспроизводимости состава катода в покрытиях. Исследования фазового состава, текстуры, субструктуры и напряженного состояния покрытий проводились рентгеноструктурным методом на дифрактометре ДРОН-3 в излучении $\text{CuK}\alpha$. Съемка дифрактограмм для фазового анализа проводилась в схеме θ - 2θ сканирования с фокусировкой по Брэггу-Брентано в интервале углов от 20 до 90 град. Размер ОКР оценивался из соотношения Селякова-Шеррера. Уровень остаточных напряжений в покрытиях был определен с помощью метода рентгеновской тензометрии. Морфологию поверхности покрытий изучали с помощью оптического микроскопа Leica MTU 253 и оптического 3D профилометра FRT. Твердость (H) и модуль

Юнга (E) покрытий измерялись наноиндентором G200 производства фирмы MTS методом CSM (непрерывного измерения жесткости). Значение H брали на глубине индентации, равной 10 % от толщины пленки. Адгезионные свойства были изучены с помощью скретч-тестера REVETEST производства компании CSM, радиус закругления алмазного индентора 200 мкм. Эрозионную стойкость оценивали по результатам кавитационных испытаний на установке с магнестрикционным вибратором МСВ-1 при частоте 20 кГц гравиметрическим методом. Абразивный износ по схеме плоскость-диск определяли гравиметрическим методом. Скорость движения поверхности абразивного диска, контактирующей с плоскостью образца, составляла 4,38 м/с, нагрузка на образец — 1 Н. Продолжительность испытаний 5 минут.

Особенности работы вакуумно-дугового источника фильтрованной плазмы с порошковыми катодами $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$

В ходе испытаний $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$ катоды использовались в оригинальном усовершенствованном источнике вакуумно-дуговой плазмы с прямолинейным фильтром [31]. Основные преимущества данного источника: высокая производительность; стабильность параметров независимо от степени выгорания катода; обеспечение равномерности толщины покрытия на большой площади при высоком качестве очистки плазмы от макрочастиц; конструкционная простота, невысокая стоимость изготовления по сравнению с известными источниками с криволинейными фильтрами. Усовершенствованный вакуумно-дуговой испаритель, специальная конструкция улавливающих макрочастицы экранов и оригинальная конфигурация транспортирующего плазменный поток магнитного поля обеспечивают высокий коэффициент пропускания фильтра — до 50 %.

В области расположения подложек создавалось магнитное поле напряженностью 50 Э двумя водоохлаждаемыми катушками Гельмгольца, выполненными из трубки $\varnothing 8$ мм, которые размещались в камере (рис. 4). Ток в катушках составлял 100 А. При этом магнитное поле в плазмоведущем тракте достигало значения $H_{\text{макс}} = 350$ Э.

Покрyтия осаждались при токе дуги 100 А и подаче импульсного потенциала смещения на подложку. Используемые параметры процесса обеспечивали скорость осаждения Cr-Al-N покрытий около 4 мкм/ч.

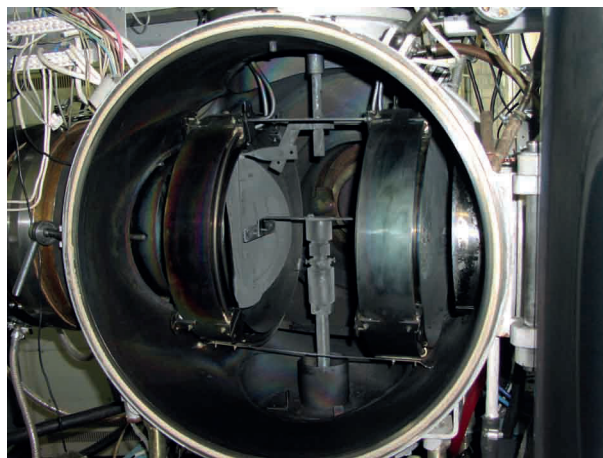


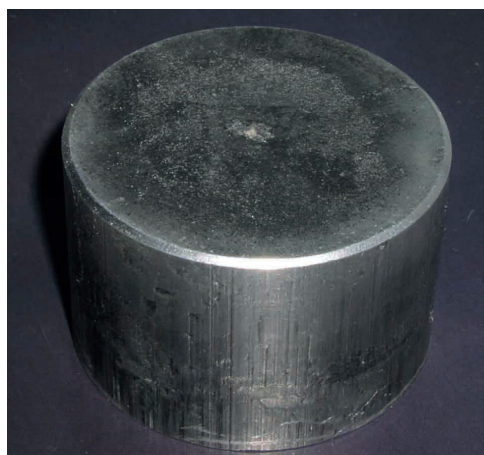
Рис. 4. Фото внутреннего устройства вакуумной камеры оригинальной установки для осаждения нитридных покрытий из фильтрованной плазмы

Испытания показали, что в исследованных режимах работы порошковые катоды состава $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$ обеспечивали стабильную работу источника без погасаний. Эрозия поверхности катодов во время работы была равномерной (рис. 5).

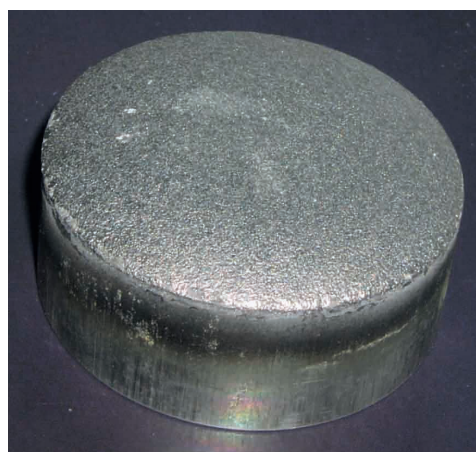
Микроскопическое изображение поверхности одного из покрытий CrAlN, синтезированных на установке с использованием порошкового катода, приведено на рис. 6. Видно, что поверхность достаточно однородна, с минимальным количеством дефектов, наличие которых в первую очередь обусловлено несовершенством поверхности стальной подложки. Согласно результатам математической обработки микроскопических изображений покрытий, полученных при различных параметрах осаждения, площадь, занимаемая дефектами, не превышает 3% поверхности покрытия, а размер большинства из них (~90 %) не более 1,4 мкм. Незначительное количество капель на поверхности покрытия свидетельствует о том, что источник обеспечивает высокое качество фильтрации потока вакуумно-дуговой плазмы.

Таким образом, порошковые катоды состава $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$ продемонстрировали высокое качество и работоспособность, что делает их вполне пригодными для изготовления

нитридных CrAlN покрытий вакуумно-дуговым методом в широком диапазоне изменений параметров осаждения.



а



б

Рис. 5. Фото цилиндрического катода $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$ до начала эксплуатации (а) и после осаждения покрытий (б)

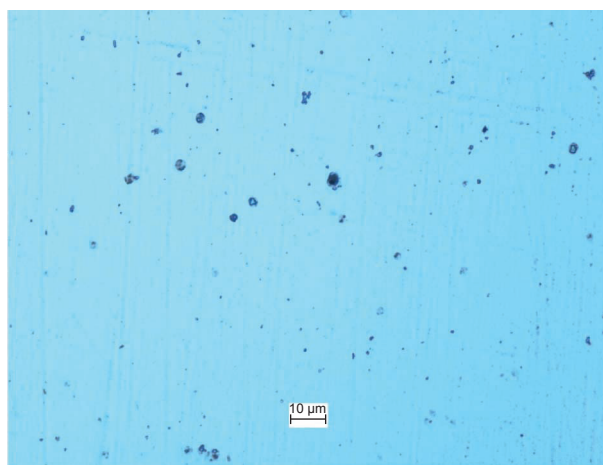


Рис. 6. Микроскопическое изображение поверхности покрытия CrAlN, синтезированного из источника фильтрованной плазмы с катодом $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$, изготовленным методом порошковой металлургии

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПOKPЫТИЙ CrAlN, ОСАЖЕННЫХ ИЗ ФИЛЬТРОВАННОЙ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОШКОВОГО КАТОДА $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$

Исследование влияния параметров осаждения на состав, структуру и механические свойства покрытий

При вакуумно-дуговом способе осаждения нитридных покрытий основными параметрами, определяющими их состав, структуру и свойства, являются давление азота в вакуумной камере, потенциал смещения на подложке и толщина конденсатов, которая регулируется временем осаждения [1, 32]. В табл. 1 приведены параметры осаждения исследованных в работе покрытий системы CrAlN, их толщина и состав, а также результаты наноиндентирования. Образцы разделены на три группы. Образцы первой группы были изготовлены для определения оптимального парциального давления азота в вакуумной камере. Образцы второй группы позволили исследовать влияние на структуру и свойства покрытий значения амплитуды высоковольтного импульсного потенциала смещения на подложке. Образцы третьей группы с покрытиями большей толщины служили для проведения дополнительных испытаний на износостойкость.

Из табл. 1 видно, что значения весовой концентрации алюминия в хроме C_{Al} (без учета азота) свидетельствуют о достаточно хорошей воспроизводимости состава катода в покрытиях. Содержание алюминия в катоде составляет 34 вес. %, а для покрытий CrAlN согласно результатам рентгенофлуоресцентного анализа значения C_{Al} находятся в пределах 32–35 вес. %. Это существенно отличается от результатов, полученных для вакуумно-дуговых покрытий системы TiSiN [33], для которых состав катода в покрытиях воспроизводится крайне неудовлетворительно, содержание кремния в покрытиях TiSiN в несколько раз меньше, чем в катоде. Главным образом это обусловлено селективным распылением кремния в результате бомбардировки поверхности растущей пленки энергетическими ионами

[29, 33–34]. Для покрытий CrAlN величина амплитуды высоковольтных импульсов на подложке не влияет на соотношение концентраций атомов металлов в пленке. С ростом амплитуды наблюдается тенденция к снижению концентрации Al в пленках, однако значительного распыления легких частиц алюминия с поверхности в результате ионной бомбардировки за время осаждения пленки не наблюдается. Эти данные совпадают с результатами, известными для подобной системы TiAlN [36].

Результаты наноиндентирования показывают, что все покрытия характеризуются достаточно высокой твердостью в пределах (30–36) ГПа и модулем Юнга около 400 ГПа. В табл. 1 также приведен параметр H/E , высокие значения которого на уровне 0,08–0,09 свидетельствуют о хорошей устойчивости материала покрытия к пластической деформации. Таким образом, во всех исследованных режимах осаждения были получены покрытия с высокими механическими характеристиками, что позволяет рекомендовать их в качестве защитных покрытий.

Рентгеноструктурные исследования показали, что во всех покрытиях формируется

нитрид с кубической структурой типа NaCl. Никаких других кристаллических фаз обнаружено не было.

Рентгеновские дифрактограммы образцов первой группы, которые были осаждены при различных значениях парциального давления азота в вакуумной камере, приведены на рис. 7. Можно увидеть, что все дифрактограммы имеют подобный вид. Единственной линией покрытий оказывается достаточно широкое отражение (220) твердого раствора (Cr, Al)N на базе нитрида с кубической структурой. Кристаллическая вюрцитная фаза на базе гексагонального AlN или фазы с меньшим содержанием азота не формируются. Кроме того, на дифрактограммах видны достаточно узкие линии подложки α -Fe, что обусловлено небольшой толщиной покрытий (~2 мкм). Вид дифрактограмм свидетельствует о формировании в покрытиях сильной аксиальной текстуры с осью [110] в направлении нормали к поверхности, что характерно для нитридных покрытий, осажденных в условиях подачи импульсного потенциала смещения на подложку [25–26, 28]. Ширина и положение линии (220) почти не изменяются при изменении давления азота

Таблица 1

Параметры осаждения и характеристики покрытий CrAlN

Группа образцов	№ образца	Парциальное давление азота, Па	Амплитуда импульсов U , кВ	Время осаждения, мин.	Толщина покрытия, мкм	Содержание алюминия, вес. %	H , ГПа	E , ГПа	H/E
I	196	0,05	1,5	30	1,9	34,8	32,5	374	0,087
	185	0,1			1,7	33,6	33,1	385	0,086
	194	0,2			2,0	32,0	33,4	388	0,086
	184	0,3			1,6	34,0	33,2	368	0,090
II	191	0,1	0	30	2,2	35,3	29,6	404	0,073
	193		0,5		2,2	35,4	33,4	390	0,087
	185		1,0		1,7	33,6	33,1	385	0,086
	186		1,5		1,6	33,3	36,2	436	0,083
	189		2,0		1,5	33,4	30,5	385	0,079
	192		2,5		1,6	33,2	30,2	373	0,081
III	195	0,1	0	60	3,8	34,4	31,9	420	0,076
	187		1,5		3,2	33,2	34,4	431	0,080
	197		2		2,9	33,1	33,3	417	0,080
	199		2,5		3,3	33,0	29,6	388	0,076

в интервале (0,05–0,3 Па), что свидетельствует о незначительных изменениях параметров субструктуры образцов: периода кристаллической решетки нитрида, размера областей когерентного рассеяния. При давлении азота 0,1 Па линии нитрида наиболее интенсивны, что обусловлено более совершенной кристаллической структурой, поэтому это значение давления было выбрано базовым для дальнейших исследований.

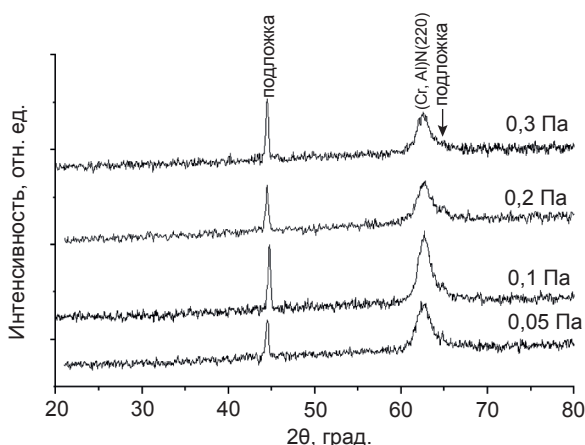


Рис. 7. Рентгеновские дифрактограммы образцов первой группы, осажденных при различных значениях парциального давления азота и амплитуде импульсного потенциала смещения 1,5 кВ

Влияние амплитуды импульсного потенциала смещения на структуру и напряженное состояние покрытий

Рентгеновские дифрактограммы образцов второй группы, которые были осаждены при различных значениях амплитуды импульсного потенциала смещения на подложке, приведены на рис. 8. На всех дифрактограммах кроме узких линий подложки α -Fe хорошо выявляются достаточно широкие пики твердого раствора замещения алюминия в решетке нитрида хрома (Cr, Al)N, который имеет кубическую структуру типа NaCl. С изменением амплитуды высоковольтного импульсного потенциала интенсивность, ширина и положение линий несколько изменяются, что свидетельствует об изменениях структурных характеристик покрытий.

Соотношение интенсивностей линий на дифрактограммах отличается от табличных значений, характерных для этой структуры, согласно которым наиболее интенсивной должна быть линия (200). Это

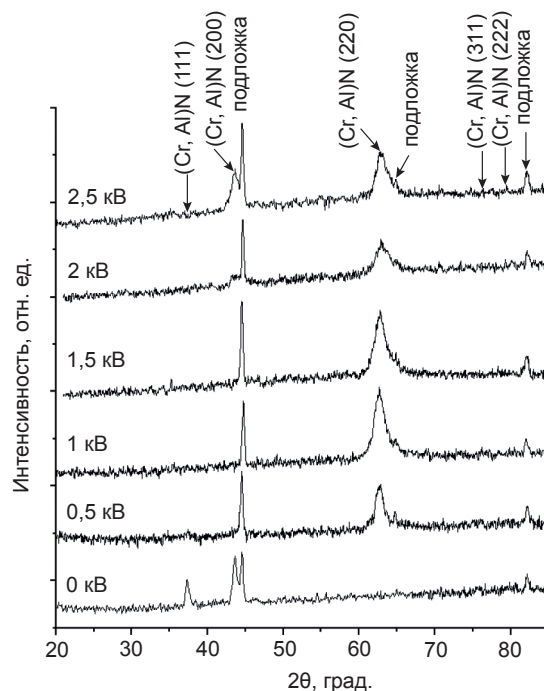


Рис. 8. Рентгеновские дифрактограммы образцов второй группы, осажденных при различных значениях амплитуды импульсного потенциала смещения подложки

свидетельствует о формировании текстуры в покрытиях. Количественные характеристики текстуры определялись по рассчитанным текстурным коэффициентам [28] для трех первых отражений нитрида: (111), (200) и (220). Результаты расчетов приведены на рис. 9.

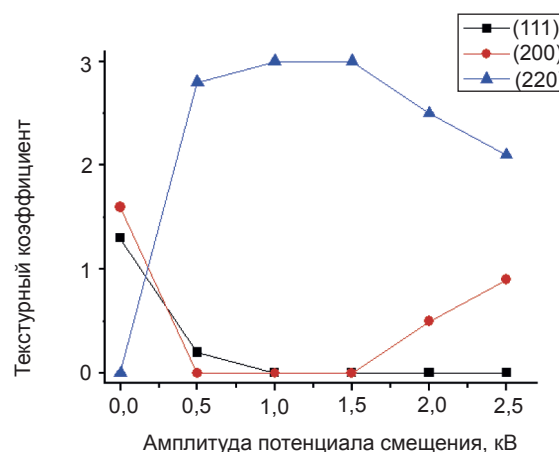
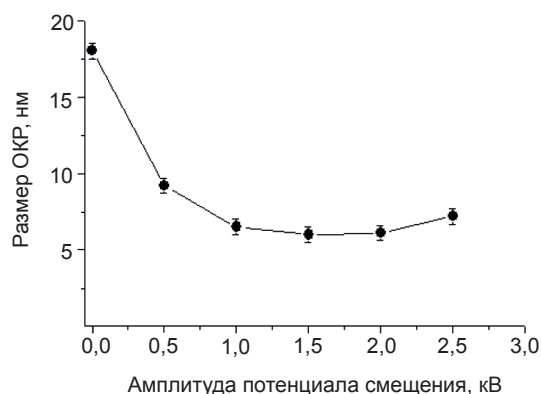


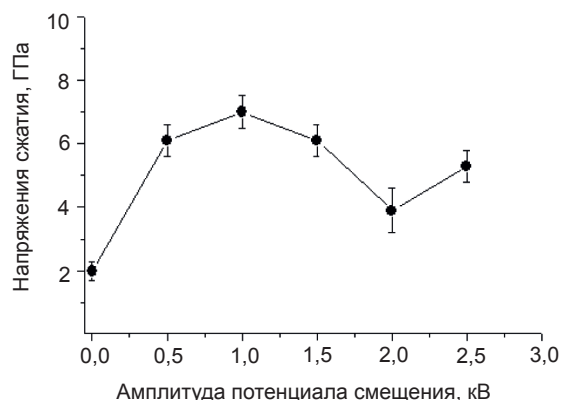
Рис. 9. Зависимость текстурных коэффициентов для отражений (111), (200), (220) нитрида (Cr, Al)N от амплитуды импульсного потенциала смещения на подложке

При постоянном потенциале смещения (в отсутствие импульсов) преобладает ориентация кристаллитов плоскостями (111) или

(200) параллельно поверхности пленки. Размер ОКР нитрида составляет величину 18 нм (см. рис. 10а). Подача импульсного потенциала смещения амплитудой до 1,5 кВ приводит к формированию сильной аксиальной текстуры [110] и снижению размера ОКР до 6 нм. С увеличением амплитуды потенциала от 0,5 до 1 кВ интенсивность линии (220) на дифрактограммах увеличивается, она становится единственной линией. При дальнейшем увеличении амплитуды до (2–2,5) кВ интенсивность линии (220) уменьшается, и на дифрактограммах появляется отражение (200). Таким образом, ориентация [100] начинает конкурировать с [110]. Подобную смену преимущественной ориентации и размера ОКР с увеличением амплитуды импульсного потенциала мы наблюдали ранее для покрытий на основе (Ti, Al)N [28].



а

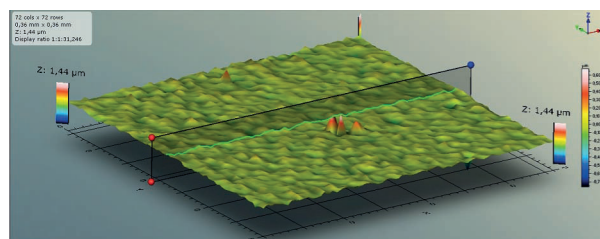


б

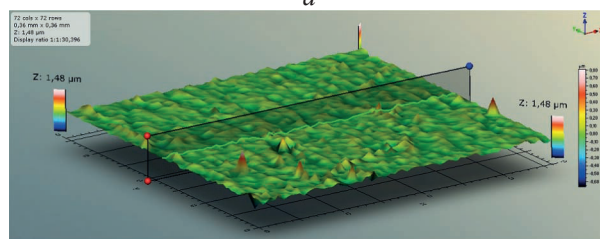
Рис. 10. Результаты рентгенографического исследования влияния амплитуды импульсного потенциала смещения на структурные характеристики покрытий (Cr, Al)N: а — размер ОКР; б — остаточные напряжения сжатия

Согласно данным оптической профилометрии (FRT) поверхность пленок

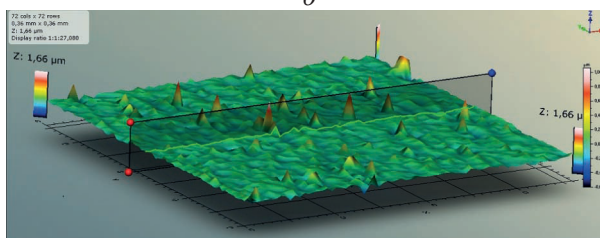
имеет ячеистый микрорельеф с размерами ячеек порядка нескольких микрометров и единичными локальными микровыступами. На рис. 11 приведены 3D-изображения поверхности покрытий. Видно, что с увеличением амплитуды импульсов размер ячеек несколько растет и увеличивается количество выступов, при этом поверхность пленки становится более шероховатой. Значения средней шероховатости поверхности покрытий приведены в табл. 2. При низких значениях амплитуды потенциала шероховатость находится на уровне 35–40 нм, а с увеличением амплитуды несколько возрастает до 50 нм.



а



б



в

Рис. 11. Полученные методом оптической профилометрии (FRT) 3D-изображения поверхности покрытий Cr-Al-N, осажденных при различных значениях амплитуды импульсного потенциала смещения на подложке: а — 0 кВ; б — 1,5 кВ; в — 2,5 кВ

Важной характеристикой покрытий, влияющей на их эксплуатационные свойства, является уровень остаточных напряжений. Результаты определения напряжений в покрытиях методом рентгеновской тензометрии представлены на рис. 10б. Видно, что с ростом амплитуды потенциала в интервале 0–2 кВ напряжения изменяются немонотонно: сначала растут, а затем уменьшаются, что

соответствует формуле Дэвиса [37]. Такой ход зависимости для покрытий (Cr, Al)N менее резкий, чем у покрытий системы TiN, где максимум напряжений достигает 10 ГПа, и отличается от зависимости для покрытий (Ti, Al)N, где уровень напряжений почти не меняется [38]. При дальнейшем увеличении амплитуды до 2,5 кВ в покрытиях (Cr, Al)N наблюдается рост напряжений, который сопровождается уменьшением твердости покрытий и изменением текстуры. Подобные изменения в системе (Ti, Al)N связывали с распадом пересыщенного твердого раствора с кубической структурой и формированием в составе покрытий гексагональной фазы AlN. Таким образом, общие тенденции структурных изменений покрытий (Cr, Al)N, которые наблюдаются с увеличением амплитуды импульсного потенциала смещения на подложке, в целом подобны изменениям, ранее зафиксированным для покрытий на основе (Ti, Al)N [28, 38].

Адгезия покрытий к подложке была оценена по результатам скретч-тестирования (Revetest). В табл. 2 представлены значения нагрузок L_{C_1} и L_{C_2} , при которых в покрытиях возникают первые трещины и происходит отслоение, соответственно. На рис. 12 приведены изображения участков трека (тестовой царапины), отвечающие вышеуказанным нагрузкам. Покрытия начинают разрушаться при достаточно низких значениях силы нагружения на уровне нескольких ньютонов, то есть адгезия к подложке невысока. Это обусловлено тем, что покрытия сильно деформируются вместе с мягкой стальной подложкой, твердость которой составляет всего 2,5 ГПа. Корреляции

между адгезией покрытий и уровнем остаточных сжимающих напряжений не наблюдается.

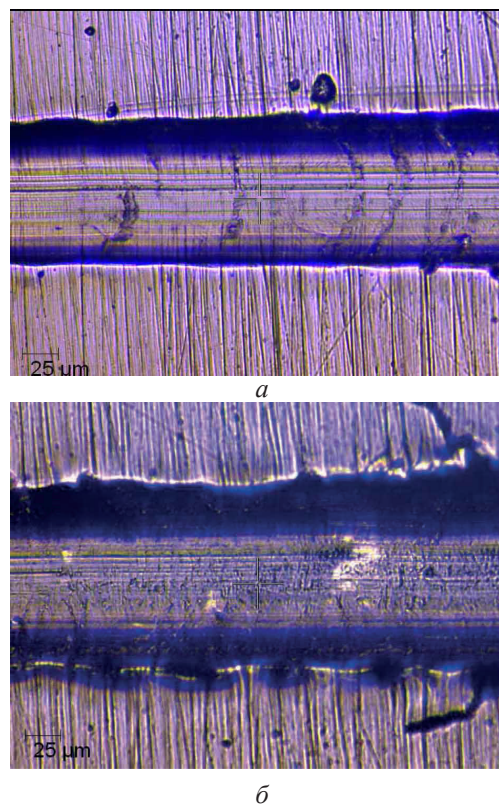


Рис. 12. Микроскопическое изображение поверхности покрытия Cr-Al-N после скретч-теста: а — $L_{C_1} = 9,0 \text{ H}$; б — $L_{C_2} = 12,4 \text{ H}$

Этот тест дает также информацию о коэффициенте трения алмазного индентора по поверхности покрытий (см. табл. 2). Значение μ_1 соответствует нагрузке L_{C_1} , при которой покрытие сохраняет свою целостность, для большинства исследованных покрытий $\mu_1 = 0,15$. При нагрузке L_{C_2} покрытие начинает разрушаться, коэффициент трения μ_2 несколько возрастает, однако не превышает значения 0,3.

Таблица 2

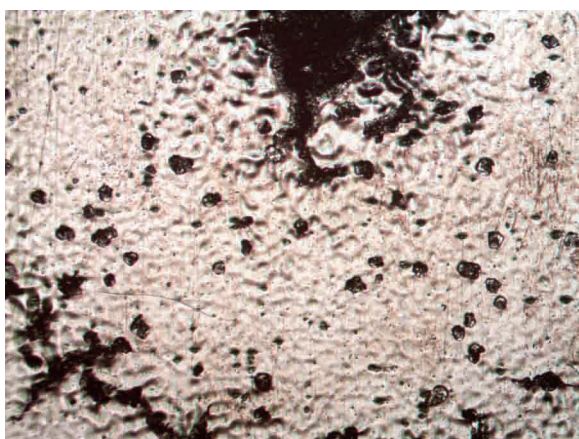
Шероховатость поверхности и результаты скретч-тестов покрытий CrAlN

№ образца	U, кВ	FRT	Revetest			
		R_a , нм	L_{C_1} , H	L_{C_2} , H	μ_1	μ_2
191	0	38	9,0	12,4	0,15	0,25
193	0,5	36	5,5	7,6	0,10	0,30
185	1,0	56	6,5	9,8	0,10	0,30
186	1,5	45	5,9	10,2	0,10	0,25
189	2,0	50	4,0	6,8	0,10	0,25
192	2,5	52	1,2	2,2	0,10	0,23

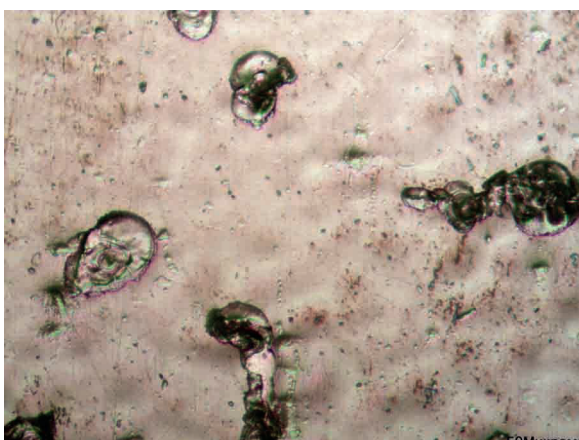
Изучение износостойкости покрытий (Cr, Al)N

Для оценки износостойкости образцы с покрытиями подвергались кавитационным и абразивным испытаниям. Вследствие кавитационного воздействия на поверхности покрытий возникают отдельные дефекты округлой формы со средним размером до 50 мкм (рис. 13). Плотность дефектов неоднородна по площади зоны кавитационного воздействия (рис. 14), что, видимо, обусловлено неоднородностью распределения ультразвукового поля, создаваемого магнитострикционным вибратором. Наибольшая эрозия наблюдается в центре зоны, а также в кольце по краю зоны.

На рис. 15а изображены кинетические кривые кавитационного износа стальной подложки и подложки с нанесенными на поверхность тонкими (1,5–2 мкм) покрытиями (Cr, Al)N. Видно, что нанесение на стальную подложку даже тонкого покрытия позволяет



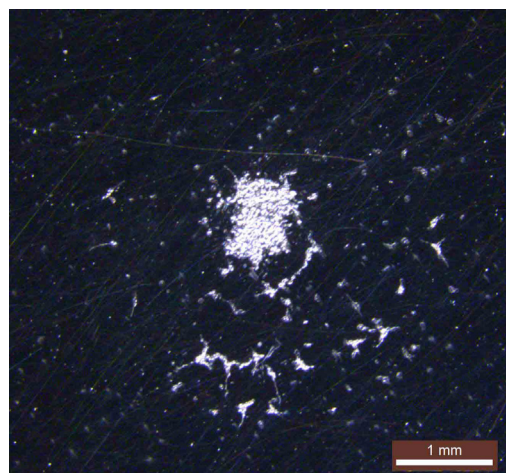
а



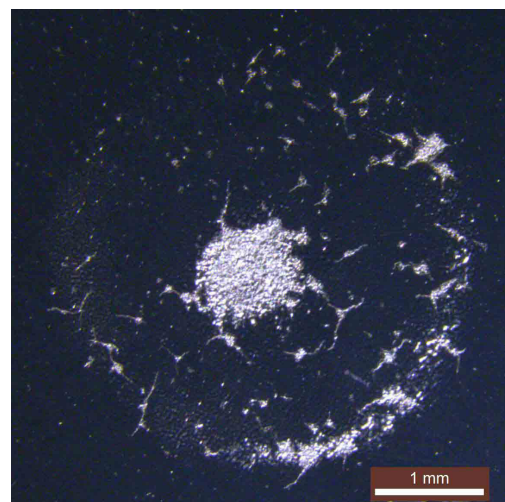
б

Рис. 13. Микроскопическое изображение кавитационных дефектов на поверхности (Cr, Al)N покрытий: а — увеличение $\times 5$; б — увеличение $\times 20$

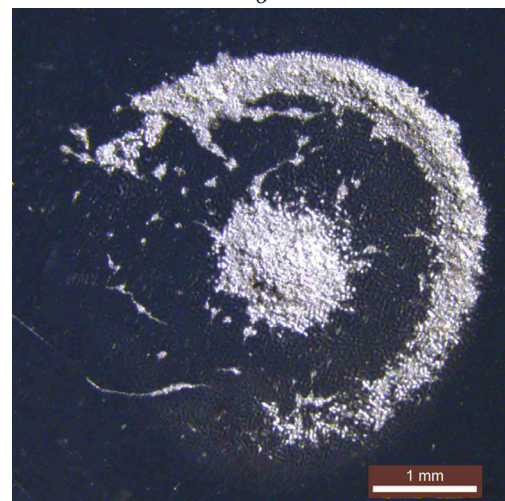
отсрочить начало быстрого кавитационного износа в 3–4 раза.



а



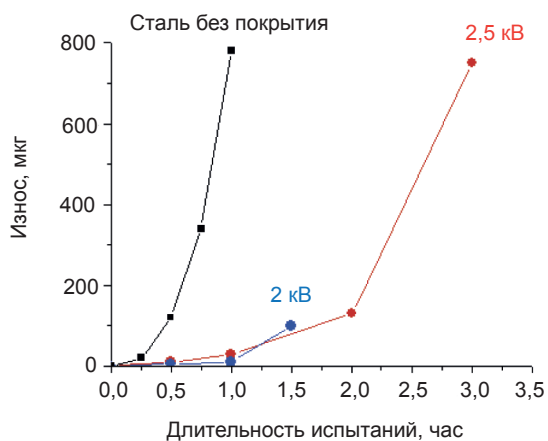
б



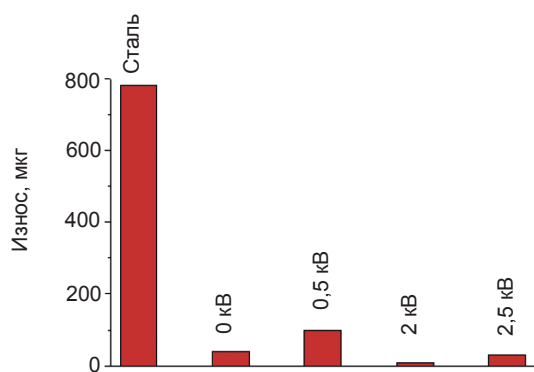
в

Рис. 14. Микроскопическое изображение зоны кавитационного воздействия на поверхности тонких (1,5–2 мкм) покрытий (Cr, Al)N после: а — 1 часа; б — 1,5 часов; в — 3 часов испытаний

На рис. 15б приведена диаграмма, иллюстрирующая кавитационный износ покрытий, осажденных при различных значениях амплитуды импульсного потенциала, после 1 часа кавитационного воздействия. Видно, что износ образцов с покрытиями на порядок меньше, чем стали. Наилучшие результаты продемонстрировало покрытие, осажденное при амплитуде 2 кВ.



а



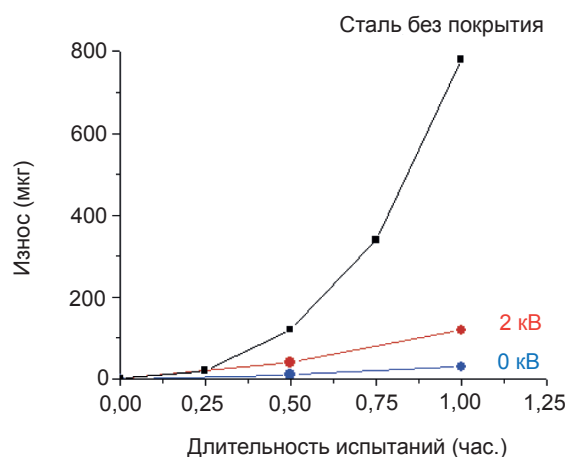
б

Рис. 15. Кавитационный износ тонких (1,5–2 мкм) покрытий (Cr, Al)N, осажденных при различных значениях амплитуды импульсного потенциала: а — кинетические кривые износа; б — износ покрытий за 1 час испытаний

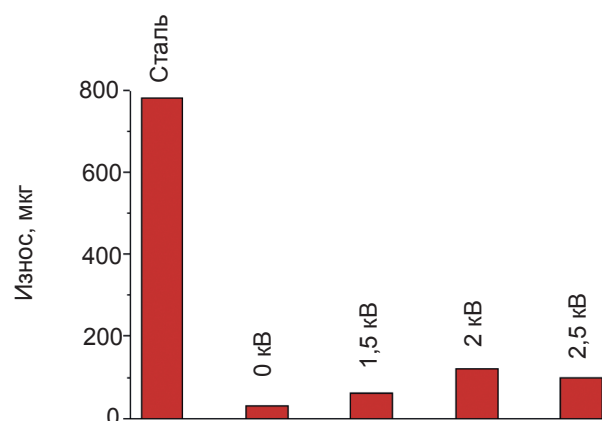
Результаты кавитационных испытаний более толстых покрытий приведены на рис. 16 и 17. Сравнивая результаты для тонких и толстых покрытий, можно сделать вывод, что независимо от толщины износ образцов с покрытиями почти на порядок меньше, чем стали. Защитные свойства покрытий, осажденных при низкой амплитуде импульсного потенциала

(0–1,5 кВ) с увеличением толщины несколько улучшаются, а при высокой (2–2,5 кВ) наоборот.

Стойкость покрытий к абразивному износу иллюстрирует рисунок 18. Все испытанные покрытия демонстрируют достаточно хорошие защитные свойства. Износ образцов с покрытиями, осажденными при импульсном потенциале смещения (1,5–2,5 кВ), на порядок меньше, чем стальной подложки. Худшие защитные свойства продемонстрировало покрытие, осажденное при постоянном потенциале смещения на подложке (амплитуда 0 кВ). Абразивный износ этого покрытия только в пять раз меньше, чем стали.

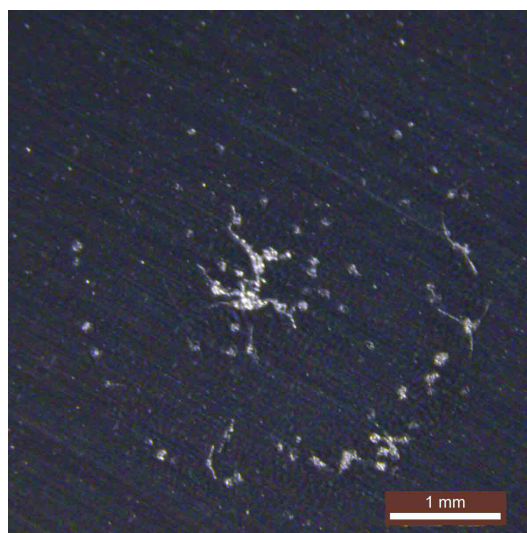


а

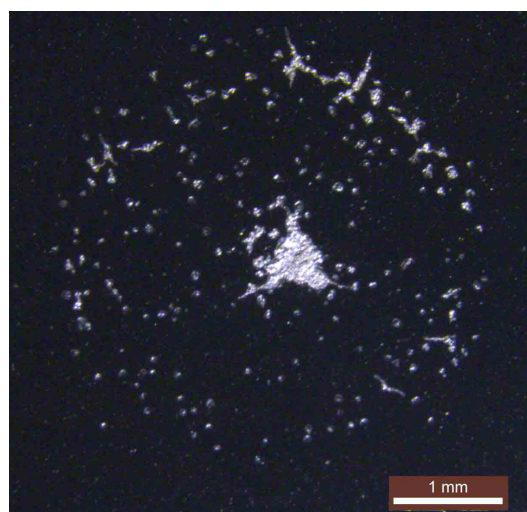


б

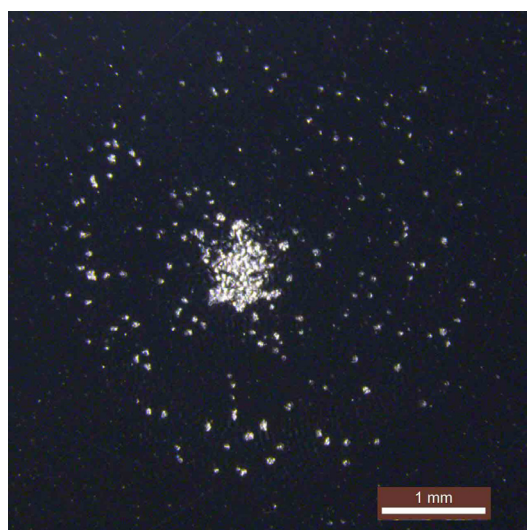
Рис. 16. Кавитационный износ толстых (3–4 мкм) покрытий (Cr, Al)N, осажденных при различных значениях амплитуды импульсного потенциала: а — кинетические кривые износа; б — износ покрытий за 1 час испытаний



а



б



в

Рис. 17. Микроскопическое изображение зоны кавитационного воздействия после 1 часа испытаний на поверхности толстых (3–4 мкм) покрытий (Cr, Al)N, осажденных при амплитуде импульсного потенциала: а — 0 кВ; б — 1,5 кВ, в — 2 кВ

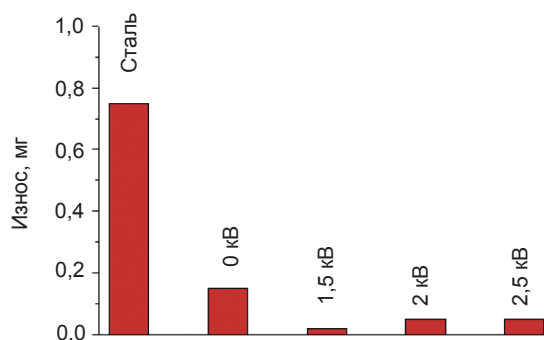


Рис. 18. Абразивный износ толстых (3–4 мкм) покрытий (Cr, Al)N, осажденных при различных значениях амплитуды импульсного потенциала

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с применением вакуумно-дугового источника фильтрованной плазмы с порошковым катодом $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$ и в условиях подачи высоковольтного импульсного потенциала смещения на подложку осаждены покрытия системы CrAlN. Исследовано влияние параметров осаждения на состав, структуру и свойства покрытий. Установлены параметры осаждения, позволяющие синтезировать покрытия (Cr, Al)N с кубической структурой типа NaCl, соотношение металлических компонентов в которых хорошо соответствует составу катода. Покрытия характеризуются шероховатостью поверхности на уровне (40–50) нм, высокой твердостью (30–36) ГПа и низким коэффициентом трения. Такие характеристики соответствуют лучшим образцам, приведенным в литературе, что позволяет использовать их в качестве защитных покрытий.

Установлено, что общие тенденции изменений структуры и текстуры покрытий (Cr, Al)N, наблюдаемых с увеличением амплитуды импульсного потенциала смещения на подложке, в целом подобны изменениям, которые известны для покрытий на основе системы (Ti, Al)N. Подача импульсного потенциала смещения амплитудой 0,5–2,5 кВ приводит к уменьшению ОКР до 6–9 нм и формированию сильной аксиальной текстуры. При увеличении амплитуды до (2–2,5) кВ ориентация [100] начинает конкурировать с [110], которая характерна для амплитуды 0,5–1,5 кВ [28].

Остаточные напряжения сжатия в покрытиях с ростом амплитуды потенциала в интервале 0–2 кВ меняются немонотонно: сначала растут

до (6–7) ГПа, а затем уменьшаются до 4 ГПа. Такой ход зависимости для покрытий (Cr, Al)N менее резкий, чем у покрытий системы TiN, где максимум напряжений достигает 10 ГПа при амплитуде 0,5 кВ, и отличается от зависимости для покрытий (Ti, Al)N, где уровень напряжений почти не меняется и остается в пределах (4–5) ГПа [28, 38, 39]. При дальнейшем увеличении амплитуды до 2,5 кВ происходит рост напряжений, что сопровождается уменьшением твердости покрытий. В подобной системе (Ti, Al)N такие изменения связывали с распадом пересыщенного твердого раствора с кубической структурой и формированием в составе покрытий нежелательной гексагональной фазы AlN [38].

Таким образом, для всех вышеупомянутых покрытий оптимальным с точки зрения минимизации напряжений и сохранения кубической структуры является значение амплитуды импульсного потенциала в интервале 1,5–2 кВ.

Следует отметить, что уровень напряжений сжатия в синтезированных покрытиях (Cr, Al)N достигает больших, но не критических значений. Обычно лучшие эксплуатационные свойства демонстрируют нитридные покрытия, уровень напряжений в которых не превышает 5 ГПа [29].

Проведенные испытания вакуумно-дуговых покрытий (Cr, Al)N, синтезированных с применением порошковых катодов, продемонстрировали достаточно высокие защитные свойства таких покрытий против кавитационного и абразивного износа. Нанесение на подложку из стали даже тонкого покрытия (1,5–2 мкм) позволяет отсрочить начало быстрой фазы кавитационного износа в 3–4 раза. Как кавитационный, так и абразивный износ покрытий, нанесенных при подаче импульсного потенциала 1,5–2,5 кВ, на порядок меньше, чем износ стали.

Катодный материал, изготовленный горячим прессованием смесей порошков хрома и алюминия, имеет структуру металлматричного композита с пористостью не более 3–4 %, с прочностью и пластичностью, позволяющей путем металлообработки резанием изготовление катодов для использования в вакуумно-дуговых технологиях осаждения покрытий.

Поиск дополнительного улучшения свойств покрытий, на наш взгляд, можно проводить в двух направлениях. Во-первых, можно варьировать состав покрытий в сторону увеличения содержания алюминия, либо усложнения их элементного состава путем добавления небольшого количества легирующих элементов при изготовлении порошковых катодов по разработанной методике. Во-вторых, необходимо обеспечить оптимальный уровень остаточных напряжений. Снижение уровня напряжений позволит добиться повышения адгезии покрытий к подложке и улучшения их эксплуатационных свойств.

ВЫВОДЫ

1. Исследована структура и фазовый состав материала, полученного горячим прессованием порошковых смесей хрома и алюминия. Установлено, что при оптимальном режиме термосиловой обработки возможно получение порошкового композита с пористостью не более 3–4 %. Горячепрессованные заготовки имеют структуру металлматричного композита с прочностью и пластичностью, достаточной для металлообработки резанием и изготовления из них катодов, используемых в вакуумно-дуговых технологиях осаждения покрытий.
2. Исследована работоспособность вакуумно-дугового источника фильтрованной плазмы с экспериментальными образцами порошковых катодов состава $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$. Стабильная работа источника в широком диапазоне изменения параметров показывает, что такие катоды пригодны для использования в вакуумно-дуговых технологиях осаждения нитридных покрытий.
3. С применением порошковых катодов $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$ в условиях подачи высоковольтного импульсного потенциала смещения на подложку осаждены покрытия системы CrAlN. Исследовано влияние параметров осаждения на состав, структуру и свойства покрытий. Установлены параметры осаждения, позволяющие синтезировать покрытия (Cr, Al)N с кубической структурой типа NaCl,

соотношение металлических компонентов в которых хорошо соответствует составу катода. Покрытия характеризуются высокой твердостью (30–36) ГПа, шероховатостью поверхности на уровне (40–50) нм и низким коэффициентом трения, что позволяет использовать их в качестве защитных покрытий.

4. Установлено, что общие тенденции изменений структуры и текстуры покрытий (Cr, Al)N, которые наблюдаются с увеличением амплитуды импульсного потенциала смещения на подложке, в целом подобны изменениям, характерным для покрытий (Ti, Al)N. Подача импульсного потенциала смещения амплитудой 0,5–2,5 кВ приводит к уменьшению ОКР до 6–9 нм и формированию сильной аксиальной текстуры. При увеличении амплитуды до (2–2,5) кВ ориентация [100] начинает конкурировать с [110], которая характерна для амплитуды 0,5–1,5 кВ.
5. Остаточные напряжения сжатия в покрытиях (Cr, Al)N с ростом амплитуды потенциала в интервале 0–2 кВ меняются немонотонно: сначала растут до (6–7) ГПа, а затем уменьшаются до 4 ГПа. Такой ход зависимости для покрытий (Cr, Al)N менее резкий, чем у покрытий системы TiN, где максимум напряжений достигает 10 ГПа при 0,5 кВ, и отличается от зависимости для покрытий (Ti, Al)N, где величина напряжений почти не меняется и остается на уровне 4–5 ГПа. При дальнейшем увеличении амплитуды до 2,5 кВ в покрытиях (Cr, Al)N происходит рост напряжений. Установлено, что оптимальные с точки зрения минимизации напряжений значения амплитуды импульсного потенциала при осаждении всех вышеупомянутых покрытий находятся в интервале 1,5–2 кВ.
6. Вакуумно-дуговые покрытия (Cr, Al)N, синтезированные с использованием порошковых катодов, продемонстрировали высокую износостойкость. Установлено, что кавитационный и абразивный износ (Cr, Al)N покрытий, осажденных при подаче импульсного потенциала 1,5–2,5 кВ, на порядок меньше, чем износ стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mayrhofer P. H., Rachbauer R., Holec D., Rovere F., Schneider J. M. Protective Transition Metal Nitride Coatings // in book: *Comprehensive Materials Processing* / ed. by S. Hashmi. — Amsterdam: Elsevier. — 2014. — Vol. 4. — P. 355–387.
2. Jan Perne. Plastic flow behavior of (Cr, Al)N hard coatings in dependence of strain rate and nanostructure // *Thin Solid Films*. — 2014. — Vol. 556. — P. 390–394.
3. Knotek O., Atzor M., Barimani A. and Jungblut F. Development of low temperature ternary coatings for high wear resistance // *SCT*. — 1990. — Vol. 42. — P. 21–28.
4. Knotek O., Löffler F., Scholl H. J., Barimani C. The multisource arc process for depositing ternary Cr- and Ti-based coatings // *SCT*. — 1994. — Vol. 68–69. — P. 309–313.
5. <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/buk/eng/01-products-services/02-balinit-coatings/indexW3DnavidW261.php>
6. Mayrhofer P. H., Music D., Reeswinkel Th., Fuss H. -G., Schneider J. M. Structure, elastic properties and phase stability of $Cr_{1-x}Al_xN$ // *Acta Materialia*. — 2008. — Vol. 56. — P. 2469–2475.
7. Yukio Makino. Prediction of phase change in pseudobinary transition metal aluminum nitrides by band parameters method // *SCT*. — 2005. — Vol. — 193. — P. 185–191.
8. Alling B., Karimi A., Abrikosov I. A. Electronic origin of the isostructural decomposition in cubic $M_{1-x}Al_xN$ (M = Ti, Cr, Sc, Hf): A first-principles study // *SCT*. — 2008. — Vol. 203. — P. 883–886.
9. Banakh O., Schmid P. E., Sanjines R., Levy F. High-temperature oxidation resistance of $Cr_{1-x}Al_xN$ thin films deposited by reactive magnetron sputtering // *SCT*. — 2003. — Vol. 163–164. — P. 57–61.
10. Bobzin K., Lugscheider E., Maes M. The effect of pulse sequence modulation and pulse energy on structural coating properties and coating composition // *SCT*. — 2005. — Vol. 200. — P. 1560–1565.
11. Makino Y., Nogi K. Synthesis of pseudobinary Cr-Al-N films with B1 structure by rf-assisted magnetron sputtering method // *SCT*. — 1998. — Vol. 98. — P. 1008–1012.
12. Holzherr M., Falz M., Schmidt T. Influence

- of hollow cathode plasma on CrAlN-thin film deposition with vacuum arc evaporation sources // SCT. — 2008. — Vol. 203. — P. 505–509.
13. Rafaja D., Wüstefeld C., Dopita M., Klemm V., Heger D., Schreiber G., Šíma M. Formation of defect structures in hard nanocomposites // SCT. — 2008. — Vol. 203. — P. 572–578.
 14. Yucel Birol. Sliding wear of CrN, CrAlN and AlTiN coated AISI H13 hotwork tool steels in aluminium extrusion // Tribology International. — 2013. — Vol. 57. — P. 101–106.
 15. Mo J. L., Zhu M. H. Sliding tribological behavior of CrAlN coating // Tribology International. — 2008. — Vol. 41. — P. 1161–1168.
 16. Lugscheider E., Bobzin K., Hornig Th., Maes M. Investigation of the residual stresses and mechanical properties of (Cr, Al)N arc PVD coatings used for semi-solid metal (SSM) forming dies // TSF. — 2002. — Vol. 420–421. — P. 318–323.
 17. Mo J. L., Zhu M. H., Leyland A., Matthews A. Impact wear and abrasion resistance of CrN, CrAlN and AlTiN PVD coatings // SCT. — 2013. — Vol. 215. — P. 170–177.
 18. Xing-zhao Ding, Zeng X. T., Liu Y. C., Fang F. Z., Lim G. C. Cr_{1-x}Al_xN coatings deposited by lateral rotating cathode arc for high speed machining applications // TSF. — 2008. — Vol. 516. — P. 1710–1715.
 19. Ying Longn, Junjie Zeng, Donghai Yu, Shanhua Wu. Microstructure of TiAlN and CrAlN coatings and cutting performance of coated silicon nitride inserts in cast iron turning // Ceramic International. — 2014. — Vol. 40. — P. 9889–9894.
 20. Tetsuhide Shimizu, Yoshikazu Teranishi, Kazuo Morikawa, Hidetoshi Komiya, Tomotaro Watanabe, Hiroshi Nagasaka, Ming Yang. Impact of pulse duration in high power impulse magnetron sputtering on the low-temperature growth of wurtzite phase (Ti, Al)N films with high hardness // TSF. — 2015. — Vol. 581. — P. 39–47.
 21. Reiter A. E., Derflinger V. H., Hanselmann B., Bachmann T., Sartory B. Investigation of the properties of Al_{1-x}Cr_xN coatings prepared by cathodic arc evaporation // SCT. — 2005. — Vol. 200. — P. 2114–2122.
 22. Sabitzer C., Paulitsch J., Kolozsvári S., Rachbauer R., Mayrhofer P. H. Influence of bias potential and layer arrangement on structure and mechanical properties of arc evaporated CrAlN coatings // Vacuum. — 2014. — Vol. 106. — P. 49–52.
 23. <http://www.plansee.com/en/products/thin-film-material/sputtering-targets-and-arcing-cathodes/aluminum-chromium.html>
 24. Zhang G. P., Gaob G. J., Wang X. Q., Lv G. H., Zhou L., Chen H., Pang H., Yang S. Z. Influence of pulsed substrate bias on the structure and properties of TiAlN films deposited by cathodic vacuum arc // Applied Surface Science. — Vol. 258. — P. 7274–7279.
 25. Mukherjee, Prokert F., Richter E., Möller W. Comparison of TiN and Ti_{1-x}Al_xN coatings deposited on Al using plasma immersion ion implantation assisted deposition // Surface & Coatings Technology. — 2005. — Vol. 200. — P. 2459–2464.
 26. Vasyliiev V. V., Luchaninov A. A., Reshetnyak E. N., Strel'nitskij V. E. Comparative characteristics of stress and structure of TiN and Ti_{0,5-x}Al_{0,5}Y_xN coatings prepared by filtered vacuum-arc PIIID method, Proceedings of the International Conference Nanomaterials: Applications and Properties. — 2012. — Vol. 1, No 2. — P. 02NFC24-1-3.
 27. Mukherjee S., Prokert F., Richter E., Moller W. Intrinsic stress and preferred orientation in TiN coatings deposited on Al using plasma immersion ion implantation assisted deposition // Thin Solid Films. — 2003. — Vol. 445. — P. 48–53.
 28. Belous V. A., Vasyliiev V. V., Goltvyanytsya V. S., Goltvyanytsya S. K. et al. Structure and properties of TiAlYN coatings deposited from filtered vacuum-arc plasma // Surface & Coatings Technology. — 2011. — Vol. 206. P. 1720–1726.
 29. Belous, Vasyliiev V., Luchaninov A., Marinin V., Reshetnyak E., Strel'nitskij V., Goltvyanytsya S., Goltvyanytsya V. Cavitation and abrasion resistance of TiAlYN coatings prepared by the PIII&D technique from filtered vacuum-arc plasma // Surface & Coatings Technology. — 2013. — Vol. 223. — P. 68–74.
 30. Прибытков Г. А., Коржова В. В., Коростелева Е. Н. Прочностные свойства и особенности разрушения композитов Al-Cr, Al-Cr-Si, полученных горячим уплотнением порошковых смесей // Деформация и разрушение

материалов. — 2013. — № 8. — С. 13–20.

31. Васильев В. В., Стрельницький В. Є. Спосіб транспортування вакуумно-дугової катодної плазми із фільтруванням від мікрочасток і пристрій для його здійснення / Патент України на винахід № 97584 від 27.02.2012.
32. Андреев А. А., Саблев Л. П., Шулаев В. М., Григорьев С. Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. — Харьков: ННЦХФТИ, 2005. — 236 с.
33. Васильев В. В., Лучанинов А. А., Решетняк Е. Н., Стрельницький В. Е., Толмачева Г. Н., Прибытков Г. А., Гурских А. В., Криницын М. Г. Применение порошковых катодов для осаждения TiSiN покрытий из фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы // PSE. — 2015. — Т. 13, № 2. — С. 148–163.
34. Белоус В. А., Заднепровский Ю. А., Ломино Н. С., Соболев О. В. Роль аргона в газовой смеси с азотом при получении нитридных конденсатов системы TiSiN в вакуумно-дуговых процессах осаждения // ЖТФ. — 2013. — Т. 83, вып. 7. — С. 69–76.
35. Кунченко В. В., Кунченко Ю. В., Картмазов Г. Н., Неклюдов И. М. и др. Наноструктурные сверхтвердые nc-TiN/a-Si₃N₄-покрытия, полученные методом вакуумно-дугового осаждения // Вопросы атомной науки и техники, Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. — 2006, № 4. — С. 185–190.
36. Belous V. A., Vasyliiev V. V., Goltvyanytsya V. S., Goltvyanytsya S. K. et al. Structure and properties of TiAlYN coatings deposited from filtered vacuum-arc plasma // Surface & Coatings Technology. — 2011. — Vol. 206. — P. 1720–1726.
37. Davis C. A. A simple model for the formation of compressive stress in thin films by ion bombardment // Thin Solid Films. — 1993. — Vol. 226. — P. 30–34.
38. Reshetnyak E. N. Structure and stress state of TiN and Ti_{0.5-x}Al_{0.5}Y_xN coatings prepared by the PIII&D technique from filtered vacuum-arc plasma // ВАИТ, Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. — 2014. — № 1 (20). — С. 159–162.
39. Akkaya S. S., Vasyliiev V. V., Reshetnyak E. N., Kazmanli K., Solak N., Strel'nikskij V. E., Ürgen M. Structure and properties of TiN

coatings produced with PIII&D technique using high efficiency rectilinear filter cathodic arc plasma // Surface & Coatings Technology. — 2013. — Vol. 236. — P. 332–340.

LITERATURA

1. Mayrhofer P. H., Rachbauer R., Holec D., Rovere F., Schneider J. M. Protective Transition Metal Nitride Coatings // in book: Comprehensive Materials Processing / ed. by S. Hashmi. — Amsterdam: Elsevier. — 2014. — Vol. 4. — P. 355–387.
2. Jan Perne. Plastic flow behavior of (Cr, Al)N hard coatings in dependence of strain rate and nanostructure // Thin Solid Films. — 2014. — Vol. 556. — P. 390–394.
3. Knotek O., Atzor M., Barimani A. and Jungblut F. Development of low temperature ternary coatings for high wear resistance // SCT. — 1990. — Vol. 42. — P. 21–28.
4. Knotek O., Löffler F., Scholl H. J., Barimani C. The multisource arc process for depositing ternary Cr- and Ti-based coatings // SCT. — 1994. — Vol. 68–69. — P. 309–313.
5. <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/buk/eng/01-products-services/02-balinit-coatings/indexW3DnavidW261.php>
6. Mayrhofer P. H., Music D., Reeswinkel Th., Fuss H. -G., Schneider J. M. Structure, elastic properties and phase stability of Cr_{1-x}Al_xN // Acta Materialia. — 2008. — Vol. 56. — P. 2469–2475.
7. Yukio Makino. Prediction of phase change in pseudobinary transition metal aluminum nitrides by band parameters method // SCT. — 2005. — Vol. 193. — P. 185–191.
8. Alling B., Karimi A., Abrikosov I. A. Electronic origin of the isostructural decomposition in cubic M_{1-x}Al_xN (M = Ti, Cr, Sc, Hf): A first-principles study // SCT. — 2008. — Vol. 203. — P. 883–886.
9. Banakh O., Schmid P. E., Sanjines R., Levy F. High-temperature oxidation resistance of Cr_{1-x}Al_xN thin films deposited by reactive magnetron sputtering // SCT. — 2003. — Vol. 163–164. — P. 57–61.
10. Bobzin K., Lugscheider E., Maes M. The effect of pulse sequence modulation and pulse energy on structural coating properties and coating composition // SCT. — 2005. — Vol. 200. — P. 1560–1565.

11. Makino Y., Nogi K. Synthesis of pseudobinary Cr-Al-N films with B1 structure by rf-assisted magnetron sputtering method // SCT. — 1998. — Vol. 98. — P. 1008–1012.
12. Holzherr M., Falz M., Schmidt T. Influence of hollow cathode plasma on CrAlN-thin film deposition with vacuum arc evaporation sources // SCT. — 2008. — Vol. 203. — P. 505–509.
13. Rafaja D., Wüstefeld C., Dopita M., Klemm V., Heger D., Schreiber G., Šíma M. Formation of defect structures in hard nanocomposites // SCT. — 2008. — Vol. 203. — P. 572–578.
14. Yucel Birol. Sliding wear of CrN, CrAlN and AlTiN coated AISI H13 hotwork tool steels in aluminium extrusion // Tribology International. — 2013. — Vol. 57. — P. 101–106.
15. Mo J. L., Zhu M. H. Sliding tribological behavior of AlCrN coating // Tribology International. — 2008. — Vol. 41. — P. 1161–1168.
16. Lugscheider E., Bobzin K., Hornig Th., Maes M. Investigation of the residual stresses and mechanical properties of (Cr, Al)N arc PVD coatings used for semi-solid metal (SSM) forming dies // TSF. — 2002. — Vol. 420–421. — P. 318–323.
17. Mo J. L., Zhu M. H., Leyland A., Matthews A. Impact wear and abrasion resistance of CrN, CrAlN and AlTiN PVD coatings // SCT. — 2013. — Vol. 215. — P. 170–177.
18. Xing-zhao Ding, Zeng X. T., Liu Y. C., Fang F. Z., Lim G. C. Cr_{1-x}Al_xN coatings deposited by lateral rotating cathode arc for high speed machining applications // TSF. — 2008. — Vol. 516. — P. 1710–1715.
19. Ying Longn, Junjie Zeng, Donghai Yu, Shanhua Wu. Microstructure of TiAlN and CrAlN coatings and cutting performance of coated silicon nitride inserts in cast iron turning. // Ceramic International. — 2014. — Vol. 40. — P. 9889–9894.
20. Tetsuhide Shimizu, Yoshikazu Teranishi, Kazuo Morikawa, Hidetoshi Komiya, Tomotaro Watanabe, Hiroshi Nagasaka, Ming Yang. Impact of pulse duration in high power impulse magnetron sputtering on the low-temperature growth of wurtzite phase (Ti, Al)N films with high hardness // TSF. — 2015. — Vol. 581. — P. 39–47.
21. Reiter A. E., Derflinger V. H., Hanselmann B., Bachmann T., Sartory B. Investigation of the properties of Al_{1-x}Cr_xN coatings prepared by cathodic arc evaporation // SCT. — 2005. — Vol. 200. — P. 2114–2122.
22. Sabitzer C., Paulitsch J., Kolozsvári S., Rachbauer R., Mayrhofer P. H. Influence of bias potential and layer arrangement on structure and mechanical properties of arc evaporated CrAlN coatings // Vacuum. — 2014. — Vol. 106. — P. 49–52.
23. <http://www.plansee.com/en/products/thin-film-material/sputtering-targets-and-arcing-cathodes/aluminum-chromium.html>
24. Zhang G. P., Gaob G. J., Wang X. Q., Lv G. H., Zhou L., Chen H., Pang H., Yang S. Z. Influence of pulsed substrate bias on the structure and properties of TiAlN films deposited by cathodic vacuum arc // Applied Surface Science. — 2012. — Vol. 258. — P. 7274–7279.
25. Mukherjee, Prokert F., Richter E., Möller W. Comparison of TiN and Ti_{1-x}Al_xN coatings deposited on Al using plasma immersion ion implantation assisted deposition // Surface & Coatings Technology. — 2005. — Vol. 200. — P. 2459–2464.
26. Vasyliiev V. V., Luchaninov A. A., Reshetnyak E. N., Strel'nitskij V. E. Comparative characteristics of stress and structure of TiN and Ti_{0,5-x}Al_{0,5}Y_xN coatings prepared by filtered vacuum-arc PIIID method, Proceedings of the International Conference Nanomaterials: Applications and Properties. — 2012. — Vol. 1, No. 2. — P. 02NFC24-1-3.
27. Mukherjee S., Prokert F., Richter E., Moller W. Intrinsic stress and preferred orientation in TiN coatings deposited on Al using plasma immersion ion implantation assisted deposition // Thin Solid Films. — 2003. — Vol. 445. — P. 48–53.
28. Belous V. A., Vasyliiev V. V., Goltvyanytsya V. S., Goltvyanytsya S. K. et al. Structure and properties of TiAlYN coatings deposited from filtered vacuum-arc plasma // Surface & Coatings Technology. — 2011. — Vol. 206. — P. 1720–1726.
29. Belous, Vasyliiev V., Luchaninov A., Marinin V., Reshetnyak E., Strel'nitskij V., Goltvyanytsya S., Goltvyanytsya V. Cavitation and abrasion resistance of TiAlYN coatings prepared by the PIII&D technique from filtered

- vacuum-arc plasma // *Surface & Coatings Technology*. — 2013. — Vol. 223. — P. 68–74.
30. Pribytkov G. A., Korzhova V. V., Korosteleva E. N. Prochnostnye svoystva i osobennosti razrusheniya kompozitov AlCr, CrAlSi, poluchennyh goryachim uplotneniem poroshkovykh smesey // *Deformaciya i razrushenie materialov*. — 2013. — No. 8. — P. 13–20.
31. Vasil'ev V. V., Strel'nitskij V. E. Sposib transportuvannya vakuumno-dugovoï katodnoï plazmi iz fil'truvannyam vid mikrochastok i pristirij dlya jogo zdijsnennya / Patent Ukraïni na vinahid No. 97584 vid 27.02.2012.
32. Andreev A. A., Sablev L. P., Shulaev V. M., Grigor'ev S. N. Vakuumno-dugovye ustrojstva i pokrytiya. — Har'kov: NNCHFTI, 2005. — 236 p.
33. Vasil'ev V. V., Luchaninov A. A., Reshetnyak E. N., Strel'nickij V. E., Tolmacheva G. N., Pribytkov G. A., Gurskih A. V., Kronicyn M. G. Primenenie poroshkovykh katodov dlya osazhdeniya TiSiN pokrytij iz fil'trovannoï vakuumno-dugovoj plazmy // *PSE*. — 2015. — Vol. 13, No. 2. — P. 148–163.
34. Belous V. A., Zadneprovskij Yu. A., Lomino N. S., Sobol' O. V. Rol' argona v gazovoj smesi s azotom pri poluchenii nitridnykh kondensatov sistemy TiSiN v vakuumno-dugovykh processah osazhdeniya // *ZhTF*. — 2013. — Vol. 83, vyp. 7. — P. 69–76.
35. Kunchenko V. V., Kunchenko Yu. V., Kartmazov G. N., Neklyudov I. M. i dr. Nanostrukturnye sverhtverdye nc-TiN/a-Si₃N₄-pokrytiya, poluchennye metodom vakuumno-dugovogo osazhdeniya // *Voprosy atomnoj nauki i tehniki, Ser.: Fizika radiacionnykh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie*. — 2006. — No. 4. — P. 185–190.
36. Belous V. A., Vasylijev V. V., Goltvyanytsya V. S., Goltvyanytsya S. K. et al. Structure and properties of TiAlYN coatings deposited from filtered vacuum-arc plasma // *Surface & Coatings Technology*. — 2011. — Vol. 206. — P. 1720–1726.
37. Davis C. A. A simple model for the formation of compressive stress in thin films by ion bombardment // *Thin Solid Films*. — 1993. — Vol. 226. — P. 30–34.
38. Reshetnyak E. N. Structure and stress state of TiN and Ti_{0.5-x}Al_{0.5}Y_xN coatings prepared by the PIII&D technique from filtered vacuum-arc plasma // *VANT, Seriya: Vakuum, chistye materialy, sverhprovodniki*. — 2014. — No. 1 (20). — P. 159–162.
39. Akkaya S. S., Vasylijev V. V., Reshetnyak E. N., Kazmanli K., Solak N., Strel'nitskij V. E., Ürgen M. Structure and properties of TiN coatings produced with PIII&D technique using high efficiency rectilinear filter cathodic arc plasma // *Surface & Coatings Technology*. — 2013. — Vol. 236. — P. 332–340.

80-летию со дня рождения
А. М. Рожкова
посвящается
(1936–1994)

ROTATING PLASMA

В. И. Фареник*

Осень 1965 года...

Они сидели друг против друга за выдавшим виды письменным столом, угол которого был освобождён от привычной для экспериментальной физической лаборатории атрибутики. Эскизы, платы, радиодетали в коробках, паяльник на подставке, гаечные ключи, крепёж и мелкие фланцы были сдвинуты в сторону, чтобы уместились пару листов бумаги.

Ближе к окну сидел невысокий пожилой седой мужчина в мешковатом твидовом пиджаке в мелкую клетку. Перед ним лежала пачка сигарет «Джебел» без фильтра, из которой он вытряхивал сигареты одну за одной, заправляя их в мундштук, держа пожелтевшими пальцами левой руки. Правая рука была занята ручкой «вечное перо» и находилась в постоянном движении: писать и рисовать, прикуривать, пояснять взмахами над бумагами. Изредка он делал секундную паузу и внимательным взглядом глубоко посаженных глаз осматривал собеседника. Как-то так — всего, не в одну точку, отстранённо. Казалось, в его тонких губах скрывались улыбка и сочувственное одобрение, поддержка, понимание многократно повторявшейся в его жизни ситуации — дружище, вникай, ты разберёшься, да, это внове для тебя, я тоже начинал часто почти с нуля, прояви характер.

Собеседнику, сидевшему к нему лицом, похоже было, характера не приходилось занимать. Молодой человек в черном лабораторном халате, каштановые волосы с пробором посередине спадали на высокий лоб. Крупный нос и решительное выражение лица, волевой подбородок, папираса в уголке рта, менял которую он из пачки «Шахтёрских» так же часто, как собеседник свой «Джебел».

В узком проходе между ограждением экспериментальных установок, с одной стороны, и объёмными шкафами для комплектации, с другой, сидели двое, лицом к беседающим. Импозантный мужчина средних лет, в строгом костюме, белая рубашка, галстук. И симпатичная полная женщина с белокурыми завитыми волосами, в очках, с блокнотом и ручкой в руках.

Мужчина с почтительным достоинством слушал беседу, женщина старалась вести конспект разговора.

За спинами, на высоком «химическом» табурете, с грустью в душе, но с внимательным выражением лица сидел я, Владимир Фареник — студент четвёртого курса кафедры физики плазмы физико-технического факультета Харьковского государственного университета. С грустью, так как сокурсники из моей подгруппы уже четверть часа сидели за проломом зоопаркового забора в кафе «Чёрный лебедь». Постарше — с пивом, помладше, как я, затракали вкуснейшими пончиками: 3 коп. с картошкой и капустой, 5 коп с мясом! К этому чай б/с за 1 коп.

Сегодня — лабораторный практикум по диагностике у А. М. Рожкова. Меня, как снимавшего угол на ул. Данилевского 10 (напротив к-тра «Харьков»), пять минут до университета, подгруппа уполномочила быть в лаборатории к 9 час.,

*Директор Научного физико-технологического центра МОН и НАН Украины, ведущий научный сотрудник кафедры материалов реакторостроения и физических технологий Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина.

получать ключи у инженера Михаила Васильевича Мозгового и под его наблюдением включать питание трех установок, «ставить их на вакуум». Это — около получаса, а там и коллеги подтягивались.

В этот раз всё пошло по-другому. Вскоре после запуска форвакуумных насосов (три единицы типа РВН-20, включены все — говорить нужно только очень громко), вошел чуть озабоченный Алим Михайлович. Ко мне: «Фамилия?» «Владимир Фареник, кафедра плазмы, Советский Союз.» — привычно отрапортовал я. «Диффузионники ещё не включал, хорошо. Так, Владимир, форнасосы вырубай, у меня серьёзные гости. Да, ребятам скажи, сегодня библиотечный день». «Бу сделано, Алим Михайлович.» — с естественной готовностью ответил я в удаляющуюся спину. Заглядывавшим в дверь сокурсникам я говорил: «Встретимся в «Черном лебеде».

Отключить форнасос это: перекрыть ручной шибер на диффузионнике, пережать ручным зажимом резиновый вакуумпровод, отключить питание на пульте управления установкой, 5 минут без спешки. Я завершал операцию уже на третьей, своей установке, она находилась через ограждение рядом со столом будущих переговоров, когда в лабораторию вошли несколько человек. Алим Михайлович опередил всех и рукой освободил на столе уголок для работы.

Расселись, начался разговор. Я же, на цыпочках, выбирался из переплетения труб и проводов. Каждая установка была заключена в своё ограждение (рамы из уголков с натянутой крупноячеистой сеткой), к каждой вела дверь. Я уже закрывал свою, не рассчитал, она закрылась с легким стуком. Все лица повернулись ко мне. С извинительным выражением лица и приложив руку к груди, я сделал движение в сторону выхода. Но взметнулась правая рука «Седого», она однозначно и властно указывала на свободный табурет. Я послушно занял место «на галёрке». Все возвратились к разговору.

Надо отметить, что, с учетом месяца в колхозе, учеба наша длилась около трех недель. Начал читать лекции по элементарной физике плазмы Борис Николаевич Руткевич, по диагностике плазмы Людмила Ивановна Крупник, велись курсы по газовому разряду, электронике, незамедлительно выделен день в неделю в УФТИ. Изучение физики плазмы только начиналось.

Со своего возвышения мне хорошо было видно, как слегка дрожащая правая рука «Седого» уверенно рисовала четкие окружности и цилиндры, пронзала их чертёжными стрелами — направлениями полей, обозначала ларморовские радиусы частиц, выстраивала их в дрейфовое движение. Незнакомые термины как-то незаметно обращались в осязаемые конструкции. Меня роднило с присутствовавшими ощущение новизны от услышанного и для них, а докладчик располагал к себе фантастической способностью войти в доверие и донести материал до сознательного понимания. А что это, нам к четвертому курсу, после лекций по матанализу Гестрина, термодинамике Цукерника, электродинамике Кирочкина, было хорошо известно.

«Скрещенные поля, вращением плазмы усилить эффект удержания, установка «Иксион», уход через торцы мал из-за соотношения продольной и поперечной составляющих скоростей частиц, пристеночная плазма с неоднородностью по радиусу, другие силы в плазме, поперечные направлению магнитного поля...» — ловил я отрывками информацию.

К разговору начал подключаться импозантный мужчина. В его замечаниях преобладали процессы в стеллараторе, очистка плазмы за счет дрейфового движения, важность изучения пристеночного движения плазмы в стационарных ловушках, к коим относится стелларатор, преодоление скин-эффекта при помощи пристеночной плазмы.

Молодой человек поглощал информацию продуктивно и с хорошей реакцией, к чему у него был природный талант. Судя по довольному выражению лица «Седого», собеседник задавал ему вопросы «в тему».

Под конец обсуждения молодой человек с напором отчаявшегося, но решившего для себя внутри человека спросил: «На чем я это буду делать? У меня нет нужного железа!». «Седой» впервые рассмеялся, нервно и облегченно, не раз он, опытный искуситель ранимых научных сердец, но превосходно разбирающийся в психологии собеседника режиссёр, задавался вопросом: а правилен ли выбор персонажа?, ибо наука, при коллективном образе исполнения, критически персонифицирована в зародыше тематики. Положив обе руки на стол, откинувшись на спинку стула, он, вполоборота ко всем, сказал: «Возьмём секцию с маленького ускорителя, линза Габора».

«Седой» сосредоточил свое внимание на молодом человеке напротив, наклонился над столом и, глядя пристально в глаза собеседнику, произнёс неожиданно для сегодняшней встречи командным, негромким, но проникающим в душу голосом: «Таким образом, вы, Алим... — сделал значительную паузу, пожевал сухими губами и повторил — вы, Алим Михайлович, без промедления приступаете к решению всех вопросов, связанных с началом экспериментальных исследований свойств плазмы, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях, литература, сотрудники, экспериментальная техника. Вы, Владимир Тарасович, пожалуйста, оказывайте помощь новой научной группе. Вращающаяся плазма — произнёс он помягче и совсем мечтательно повторил — *rotating plasma...*»

После того как ушли почтенные гости, я заторопился к выходу, в «Черный лебедь». Алим Михайлович отрешенно сидел за столом. Природная воспитанность и естественный интерес побороли желание припустить аллюром к сокурсникам, я подошел к находившемуся в лёгкой прострации преподавателю: «Похоже, вас сильно озадачили, Алим Михайлович?» «Не то слово, ты хоть знаешь, Володя, кто приходил?» Я ответил отрицательно, мол белокурую женщину встречал в коридоре. «К. Д., Кирилл Дмитриевич Синельников, директор УФТИ, заведующий нашей кафедрой, а с ним Толок Владимир Тарасович, после К. Д. первый человек по термояду. Белокурая, как ты говоришь, ученый секретарь кафедры Александра Павловна Страшко. Озадачили. А что мне с этим хозяйством Людмилы Крупник делать?» — махнул он рукой на установки в лаборатории. «Ну, Алим Михайлович, железо — оно и в Африке железо», — ответил я фразой, которую мы часто от него слышали. Скромная шутка, казалось, расшевелила его. «Молодец, сечешь. А ты куда распределён на практику, иди ко мне в лабораторию.» «Спасибо, за доверие, Алим Михайлович, в УФТИ я у Швеца Олега Михайловича, вместе с Григорием Мирошниченко. Входим в курс дела на установке «Алмаз». Там, кстати, что-то похожее на наложенные поля имеем.» «Скрещенные поля, студент. А Олег — сильный мужик, спец по ВЧ-нагреву, а поле переменное он, действительно, поперёк магнитного загоняет. К. Д. говорил о его работах. Ну, что же, Владимир Фареник, иди к «корешам» в «Черный лебедь».

Я вышел из университета и, замявшись на секунду, зоопарк — направо, решительно повернул налево, в сторону парка им. Горького, на остановку служебного автобуса УФТИ, прикинув про себя: «А что, в институте хорошая столовая, копеек на двадцать–тридцать пообедать».

Мне трудно было передать настроение присутствовавших на встрече, но понял, что случилось нечто очень важное. Вспоминался «Седой», благоговейно произнесший слова: «Вращающаяся плазма... ROTATING PLASMA.»

Действующие лица этой части:



«Седой» — Кирилл Дмитриевич Синельников, академик АН Украины, директор Украинского физико-технического института, заведующий кафедрой физики плазмы



«Импозантный мужчина» — Толок Владимир Тарасович, один из руководителей исследований управляемого термоядерного синтеза в Украинском физико-техническом институте



«Симпатичная женщина» — Александра Павловна Страшко, ученый секретарь кафедры физики плазмы



«Молодой человек» — Алим Михайлович Рожков, инженер-конструктор экспериментальных мастерских физико-технического факультета



Владимир Фареник, студент четвертого курса (на снимке слева)

Много лет спустя, занявшись самостоятельной наукой, в том числе, научно-организационной работой, В. И. Фареник осознал, что в то далёкое время довелось быть свидетелем постановки проблемы на несколько десятков лет вперёд гениальным мыслителем.

Осень 2015 года...

Рабочий день начался со звонка одного из мобильных телефонов. Киевстар, по звуку сигнала определил Фареник, на связи был профессор Лисовский. «Приветствую тебя, Валерий Александрович, и поздравляю!» — ответил Фареник, увидев на опознавателе номера знакомую фамилию. «Вероника Коваль-Деревянко вчера успешно, по нулям, защитила кандидатскую, внесите в свой список, Владимир Иванович!» «Спасибо, Валерий, реферат я читал. У тебя уже два кандидата. Как дела у Кати Артюшенко?» «Будет в срок защита, и Руслан Осмаев активно работает.» «Успехов, Валерий Александрович!» Фареник открыл папку с пока еще условным названием «Школа экспериментальной физики плазмы А. М. Рожкова» Вероника Коваль стала двадцать восьмым кандидатом наук (см. дополнение 2).

В. А. Лисовский в давнем постоянном контакте с профессором Владимиром Дмитриевичем Егоренковым, долгие годы работавшем в ОНИЛ ДПТП зав. теоретическим отделом, защитившем докторскую диссертацию по тематике Константина Николаевича Степанова, весьма успешно развили фронт исследований свойств газового разряда в комбинированных полях. Оба изобретательные по части простых, но оригинальных устройств, В. А. Лисовский экспериментально с хорошим теоретическим аппаратом, В. Д. Егоренков от теории с тонким пониманием возможностей отлаженного «железа», они не уставали удивлять постановкой КЛАССИЧЕСКИХ задач с оригинальнейшими решениями по вопросам E - и H -разрядов, их комбинаций, возникновению и развитию этих разрядов в технологических установках. Казавшаяся «чистой» наукой классика протекания различных стадий прямого разряда (вспомним Таунсенда и Ленгмюра), тонкое зажигание ВЧ-диодного разряда, знание скоростей дрейфа электронов в реактивных газах, позволяли существенно оптимизировать ионно-плазменные источники, а то и вовсе снизить почти на порядок энергозатраты при обработке деструктурирующихся от воздействия температуры материалов нанoeлектроники. Их работа органично проходила рядом со строительством сложнейших экспериментально-технологических устройств — последний «крик» — кластерная установка многовариантной обработки наноструктур А. В. Зыкова с группой — не заглушал негромкой работы Валерия Лисовского с аспирантами.

В 2008 году В. Лисовский успешно защитил докторскую диссертацию, полностью посвященную классическим вопросам физики газового разряда (см. дополнение 3).

В лаборатории А. М. Рожкова, наряду с решением задач по горячей плазме, как-то: неустойчивости и нагрев вращающейся плазмы, формирование в ней азимутальных и продольных ионных потоков и связанная с таким движением неустойчивость параметров, слиппинг-эффекты в пограничных слоях плазмы в E/H -полях, квази- и нелинейные процессы, параметрическая распадная раскачка колебаний плазмы и т. д., требовались доскональные знания так называемых элементарных процессов и плотность-температура-пространственное и фазовое распределение параметров. Алим Михайлович и, подключившиеся к регулярному обсуждению К. Н. Степанов и В. А. Супруненко, жестко ставили перед сотрудниками лаборатории КОЛЛЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ (с подачи В. Т. Толока прижилось название) освоить газовый разряд, чтобы в подробностях знать ближнюю историю нашей плазмы. Поэтому на столах, рядом со статьями и книгами о микронеустойчивостях плазмы Степанова, Силина, Михайловского, Цитовича появились труды по ионизованным газам Капцова, Мак-Даниеля, Грановского, Энгеля...

Со статьями, посвященными основной теме исследований нескольких лет — обнаружению новой РЕЗОНАНСНОЙ ИОННО-ЦИКЛОТРОННОЙ неустойчивости во вращающейся плазме (научная общественность быстро поверила в исключительную новизну эффекта, «Письмо в ЖЭТФ»!), приведенными ниже, появились изыскания в области газоразрядных процессов.

**Из перечня
научных и учебно-методических работ
Фареника Владимира Ивановича**

№ п/п	Название	Характер работы	Выходные данные	Соавторы
1	2	3	4	5
1.	Резонансное возбуждение ионно-циклотронных колебаний во вращающейся плазме	печат.	«Письма в ЖЭТФ», 10, вып. 2, 71. 1969	Рожков А. М. Степанов К. Н. Супруненко В. А. Власов В. В.
2.	Резонансная циклотронная неустойчивость во вращающейся плазме	печат.	Ротапринт ФТИ АН УССР, ХФТИ 69-35, Харьков, 1969	Рожков А. М. Степанов К. Н.
3.	Резонансное возбуждение ионно-циклотронных колебаний в плазме, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях	печат.	УФЖ, 14, вып. 2, 1856, 1969	Власов В. В. Рожков А. М. Степанов К. Н. Супруненко В. А.
4.	Cyclotron resonance instability in rotating plasma	печат.	Plasma Physics, 12, 519, 1970	Rozkov A. M. Stepanov K. N. Suprunenko V. A. Vlasov V. V.
5.	Исследование возбуждения ионно-циклотронных колебаний в плазме, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях	печат.	Сб. «Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза», вып. 1. из-во «Наукова думка», Киев, 1971	Рожков А. М. Степанов К. Н. Супруненко В. А.
6.	Экспериментальное исследование кинетической неустойчивости в альтернативном магнетроне Габора	печат.	ЖТФ, 42, вып. 8, 1625, 1972	Власов В. В. Рожков А. М. Степанов К. Н. Супруненко В. А.
7.	Резонансная циклотронная неустойчивость во вращающейся плазме	печат.	Сб. «Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза» вып. 3, стр.193, из-во «Наукова думка», Киев, 1972	Рожков А. М. Степанов К. Н. Супруненко В. А.
8.	Способ нагрева плазмы	печат.	Авторское свидетельство № 352610. Официальный бюллетень Комитета по делам открытий и изобретений при Совете Министров СССР, № 4, стр. 164, 1973	Власов В. В. Рожков А. М. Степанов К. Н. Супруненко В. А.

Власов В. В., Кривонос М. И., Рожков А. М., Сосипатров М. В., Фареник В. И. «Экспериментальное исследование разряда с накаленным катодом в скрещенных полях» // ЖТФ. — 1974. — Т. 43, вып. 10. — 822 с.;

Власов В. В., Ковалев В. В., Рожков А. М., Фареник В. И. «Исследование собственного электрического поля в плазме высокочастотного разряда в магнитном поле» // IV Всесоюзная конференция по физике низкотемпературной плазмы. — Киев. — 1975. — Т. 1. — 85 с.

Дальнейшее изучение механизма резонансной ионно-циклотронной неустойчивости (РЦН) дало новые эффекты, в том числе, с неожиданными продолжениями.

Например, работа Власов В. В., Рожков А. М., Кожарин А. А., Фареник В. И. «Энергетические спектры ионов и коллективные эффекты в ионном источнике с осциллирующими электронами» // ЖТФ. — 1974. — Т. 44, вып. 9. — 2023 с. заинтересовала кафедру технологии радиоэлектронной аппаратуры Минского радио-технического института, что послужило началом технологических разработок в области нанесения тонких плёнок.

Профессор Латышев из Московского авиаинститута обратился с предложением совместных работ по двигателям малых тяг.

Сам Герман Батанов из Лебедевского физического института АН СССР предлагал сотрудничество по пучковой плазме.

Алим Михайлович был непоколебим: вращающаяся плазма, ROTATING PLASMA.

Ситуативное исключение было сделано только для коллег из Минского радиотехнического института, где работал Михаил Пикуль, дипломник А. М. Рожкова [1].

Алим Михайлович защитил кандидатскую по механизму раскачки РЦН, легко. Новизна — неоспорима, в списке работ — Письмо в ЖЭТФ! Отзывы Силина, Рухадзе, Михайловского. Всемирная поддержка работ Степановым. Руководитель — Толок. Первая диссертация по физике плазмы. Триумф! «И только миг между прошлым и...» настоящим — пять лет прошло с памятной встречи с К. Д.

Через три с небольшим года Фареник представил комплекс исследований неустойчивостей плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях, в котором, кроме углублённого изучения РЦН, исследован диокотронный эффект в прианодном электронном слое, распадное взаимодействие диокотронных и ионно-циклотронных колебаний, показана возможность перекачки энергии слоя в нагрев ионной компоненты (к слову, тоже «Письмо в ЖЭТФ»).

Через два года великолепную работу, где плазма находилась уже в комплексе комбинированных — магнитного и электрического внешнего постоянного, от ВЧ-генератора переменного и собственного плазмы — полей представил Вячеслав Васильевич Власов. Параметрическое взаимодействие в условиях нижнего гибридного резонанса — надежда для нагрева плазмы на частотах вблизи ионной циклотронной, дитя Степанова.

Новый шаг в экспериментальной технике в группе Рожкова — ВЧ-разряд в магнитном поле. Осваивали новую высокочастотную технику.

Во второй половине 70-х лаборатория коллективных процессов в плазме А. М. Рожкова становится заметным явлением на физтехе. Костяк: Рожков, Фареник, Власов, Михаил Сосипатров и Александр Кожарин, недавние дипломники, быстро стали ведущими сотрудниками лаборатории. Аспирант Юрий Якимчук, студенты Николай Юнаков, Юрий Крячко, Виктор Редванский, Александр Маслов, Александр Бизюков органично вливались в микрогруппы. Вошли в высокое мастерство уже инженеры Михаил Кабыченко, Михаил Кривонос. Константин Николаевич Степанов на постоянной основе (финансирование позволяло, Толок и Залюбовский помнили наказ К. Д., да и результаты «шли») привлек к работе в лаборатории своих теоретиков-соискателей Анатолия Покроева, Юрия Елисеева, Игоря Гордиенко. Чуть позже — кандидата наук Владимира Егоренкова. После службы в армии появился цепкий в науке

Александр Лучанинов, из ХФТИ перешел прекрасный эксперименталист, как говаривал Михалыч, Николай Манзюк.

Фареник в который уже раз смотрел этот список Школы Рожкова. Отбор в него проводился по двум критериям. Первый — специальность по номенклатуре ВАК «физика плазмы» (несколько лет название этой специальности было «физика и химия плазмы»). Одна работа талантливого Будянского Александра Михайловича защищена была по специальности «приборы и устройства для создания и использования плазмы», она была пионерской по вопросам исследования комбинированных разрядов диодного и индукционного типов, что полностью отвечало второму критерию — в темах, предмете, инструменте и объектах исследований диссертаций должны быть упомянуты скрещенные или в различных комбинациях МАГНИТНОЕ: постоянное, вихревое и ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ: постоянное, переменное от внешнего источника, собственное разряда ПОЛЯ (см. список 1).

Список 1

	Соискатель	Научный руководитель	Год защиты
1.	Рожков А. М.	Толок В. Т.	1970
2.	Фареник В. И.	Толок В. Т., Рожков А. М.	1974
3.	Власов В. В.	Степанов К. Н., Рожков А. М.	1976
4.	Пикуль М. И.	Достанко А. П.	1976
5.	Сосипатров М. В.	Рожков А. М.	1979
6.	Редванский В. М.	Рожков А. М.	1991
7.	Маслов А.	Рожков А. М.	1982
8.	Якимчук Ю.	Рожков А. М.	1981
9.	Бориско В. Н.	Лапшин В. И.	инф. нет
10.	Битная И.	Лапшин В. И.	инф. нет
11.	Лучанинов А. А.	Рожков А. М.	инф. нет
12.	Петрушеня	Бориско В. Н.	инф. нет
13.	Середа И. Н.	Бориско В. Н.	инф. нет
14.	Юнаков Н. Н.	Фареник В. И.	1985
15.	Бизюков А. А.	Луценко Е. И.	1986
16.	Зыков А. В.	Фареник В. И.	1987
17.	Марущенко Н.	Фареник В. И.	1989
18.	Лисовский В. А.	Фареник В. И.	1993
19.	Дудин С. В.	Фареник В. И.	1995
20.	Ушаков А.	Фареник В. И.	1997
21.	Будянский А. М.	Фареник В. И.	1999
22.	Положий К. И.	Фареник В. И.	2001
23.	Яковин С. Д.	Фареник В. И.	2002
24.	Бизюков И. А.	Азаренков Н. А.	инф. нет
25.	Кашаба А.	Бизюков А. А.	инф. нет
26.	Харченко Н. Д.	Лисовский В. А.	2011
27.	Рафальский Д.	Дудин С. В.	2011
28.	Коваль В.	Лисовский В. А.	2015
Доктора наук: Рожков А. М. — 1984, Бизюков А. А. — 2002, Лисовский В. А. — 2008			

И еще одна отличительная особенность — все работы посвящены ЭКСПЕРИМЕНТУ, с обращением к работам теоретического характера, построением собственных аналитических или математических моделей, расчетами, сопоставлением всего перечисленного с результатами экспериментов. Фареник подумал, что отбирать-то и не было особой необходимости, ибо все работы сотрудниками и аспирантами лаборатории коллективных процессов Алима Михайловича, а, позднее, его учениками и последователями и выполнялись, исходя из этих критериев, как некоей заданности. Впоследствии, в СКТБ «Контур», отраслевой лаборатории диагностики плазменных технологических процессов, в которых выполнялся большой объем работ по заказам промпредприятий, добавилось требование обязательного включения приложений с конкретными прикладными результатами. На кафедре физических технологий была принята такая же практика.

А. М. Рожковым было заведено, что каждая работа выполнялась на «своей» экспериментальной установке или с принципиальной модификацией существовавших. И в этом не было никакой искусственности, так как каждая последующая работа ставила серьезнейшие задачи при естественном строгом соблюдении основной тематики и преемственности.

Фареник закурил сигарету. Вспомнилось давнее посещение лаборатории А. М. Рожкова Кириллом Дмитриевичем Синельниковым — К. Д. Давнее... Ровно 50 лет прошло, пятьдесят.

Звонок по внутренней связи отвлёк Фареника от воспоминаний. Заместитель по научной работе Петр Васильевич, несколько текущих вопросов требуют обсуждения. Необходимо запускать процесс перерегистрации нашего с Университетом научного журнала «Физическая инженерия поверхности», раз в пять лет. Кажется, вчера бегал по Киеву с бумагами, а уже пора. Затянули вопрос с аттестацией научных сотрудников, пригласили начальника отдела кадров, определили сроки, тем более, что двух старших научных сотрудников пора представлять к соответствующим научным званиям. Обнадеживающая информация из министерства о финансировании одного из проектов по твёрдотельной тематике. Успокаивают чиновники, урезали не сильно. Отдел кадров напоминает, что в течение двух-трёх недель из отпуска по уходу за ребёнком выходит сотрудница. Деньги на зарплату — ? Инженер, 13-й разряд, ого! В дверь заглянула секретарь-референт, срочный звонок из министерства. Департамент научно-технического развития требует полный комплект уставных документов института. Ответственный — директор. В дверь вошел Зыков Александр Владимирович с оговоренным заранее вопросом обсуждения содержания докторской. Саша, ты моё спасение, заходи! Сашенька, проходи, включай чайник, у меня силовая проводка, кофе, пожалуйста, располагайся.

Фареник выпил таблетки и на несколько минут отключился.

...Весной 1966-го меня и Виктора Бителёва вызвал к себе Георгий Анатольевич Милютин, наш декан. В свойственной ему изящной манере мягко и демократично поставив перед фактом, Жора (так уважительно, между собой студенты, и, между собой большинство преподавателей, называли Г. А. Милютину) сообщил, что по решению заведующего кафедрой Кирилла Дмитриевича Синельникова мы откомандированы для прохождения всех практик и выполнения дипломной работы в лабораторию А. М. Рожкова с последующим распределением для работы в Университете на кафедре физики плазмы или направлением в аспирантуру.

Должен сказать, что среди студентов невозможно было найти недовольных Жорой в случае расхождения планов с реальными. Мы понимали: служба у Жоры на тяжелейшем факультете не проста, а мы есть частица этого сложнейшего симбиоза.

Я ушел к О. М. Швецу сказать прощальные слова, Виктор известил своего руководителя практики в УФТИ. После чего мы направились представляться Рожкову.

Нашли мы Алима Михайловича в экспериментальных мастерских факультета, разгоряченного, в прожженном местами черном халате, у вакуумной плавильной печи. В руках

у него был скребок-шаберок, которым он без энтузиазма пытался соскрести со стенок вакуумной камеры серебристый налёт. Мы сходу предложили свою помощь и после ответа А. М. поняли, что скучно нам здесь не будет. Михаил Васильевич Мозговой, которого мы уже знали по лабам, растолковал тихонько, Михалыч хотел для повышения чувствительности какого-то реле посеребрить контакты, использовав для этого кофейную серебряную ложечку, расплавив ее в вакуумной печи, способной на тончайшие металлургические процессы. Но то ли с вакуумом не угадал, то ли с температурой тигля, а ложечка тонкой пленочкой разлетелась по стенкам камеры, безвозвратно. Алим Михайлович отряхнул руки над умывальником, окликнул нас с Виктором и мы двинулись в знакомую нам лабораторию.

Постановка экспериментальных тем работ много времени не заняла.

Мне была определена установка, которую я приводил в стадию физического пуска в осеннем семестре прошлого года — импульсный коаксиальный источник плазмы, «пушка Маршалла». Задача состояла в освоении тонкостей сложной конструктивно системы, приведении в рабочее состояние всех её элементов. Особенную сложность представляла неукоснительно точная работа схемы строго поочерёдного, через заданные микросекундные промежутки времени, включения схем питания импульсного источника плазмы, так называемая линия задержки, небольших размеров прибор, от которого зависела эффективность функционирования многотонной установки.

Задача: установка «работает в полный рост, как конфетка», получать импульсные плазменные сгустки. Цель: методом зондирования сгустков быстрым нейтральным пучком определить их характеристики — временная структура, размер «головы» сгустка и хвостовой части, плотность частиц в голове, режимы уверенного разделения частей сгустка для заполнения плазменной ловушки сильноионизованной, с высокой плотностью плазмы головы, отсекая хвост — нейтралы, примеси. Помогал мне Николай Шулика, сотрудник лаборатории Л. И. Крупник из ХФТИ.

Виктору было сказано: мы с тобой на Облако-1. Они ушли в другую комнату. Как позже я узнал, так назвал А. М. установку, сооруженную на базе линзы Габора, которая, как и обещал К. Д., была доставлена из УФТИ. Это был передний край лаборатории, поэтому А. М. определил туда Виктора, с которым по теоретической подготовке мы были равны, но мой коллега носил почетнейшее звание «радиолюбитель». А это значило серьёзное владение основами электро- и схемотехники, электроники. У меня, при прочих равных навыках, полученных в Университете, за спиной был судомодельный кружок, третий взрослый разряд по лёгкой атлетике и полученный на летних подработках 2-й разряд токаря-фрезеровщика.

Надо сказать, над «Облаком-1» А. М. создал плотную завесу тайны, Виктор Бителёв тоже строго соблюдал секретность. О результатах, полученных на «Облаке-1» мы с Ефимом Шульманом — третий дипломник А. М. — услышали уже на защите дипломов, а в помещение с этой установкой я впервые попал после зачисления на работу в лабораторию А. М. Рожкова в январе 1968-го. «А, местные дрязги.» Коротко пояснил мне А. М.

«Владимир Иванович, вот более-менее близкое к оптимальному содержанию,» — услышал Фареник голос Александра, разложившего на столе несколько отпечатанных с большим межстрочным интервалом страниц, — синтезировал обсуждения с вами и Стасом Дудиным». Фареник очнулся от забытья, как раз вчера он по Скайпу беседовал с Виктором Борисовичем Бителёвым, попросил его прислать любые материалы, так как его диплом — первая формально работа, хоть и неопубликованная, считается рукописью — по скрещенным полям. Обещал и тему вспомнил: **«Некоторые вопросы кинетики плазмы в скрещенных магнитном и электрическом полях».**

Разговор с А. Зыковым проходил в привычном ритме. Александр был многословен, громадный багаж материала накоплен. Фареник ловил неувязки и коротко рубил по ним.

Сегодня большая часть выпадов не достигала цели. Александр всё уверенно разложил по своим местам. Оппонент смотрел на листки с содержанием будущей докторской и думал об астрономическом расстоянии между бытующими понятиями «написать» и «сделать» диссертацию, хотя процессы эти и взаимосвязаны формально.

«Генерация и транспортировка ионных потоков в плазменных системах с комбинированными электрическими и магнитными полями».

По публикациям результатов это творение автора Зыкова А. В. занимает более двадцати лет экспериментального научного труда, десятки моделей и рабочих технологических пучковых и плазменных источников со скрещенными EH -полями, на основе разрядов с комбинациями этих полей и комбинациями самих разрядов, несколько экспериментальных и экспериментально-технологических устройств и установок, сотни экспериментальных приспособлений и технических хитростей и уловок (см. дополнение 4).

Эта работа была СДЕЛАНА, выполнена коллективом одиозумцев, у каждого из которых свой подход к теме, свой конёк в решении физических задач, свой набор исполнительских особенностей и привычек, своё АВТОРСТВО, которое с честью, когда приходит время, без натужных разборок раскладывается по индивидуальным корзинам. При этом бережно охраняется стержневое направление, соблюдается преемственность — постулаты А. М. Рожкова, хотя в этой когорте уже совсем мало прямых последователей А. М. Всего несколько лет Алим Михайлович возглавлял кафедру физических технологий, но принципы крепости здорового научного духа достигли молодёжи.

«Саша, я что-то не могу тебя сегодня сильно зацепить, стройно, логично. Работай с Николаем Алексеевичем, заведующим кафедрой, Азаренков очень сильный научный консультант. Сам он уже плеяду своих по тематике докторов выпустил.»

Фареник недавно обсуждал с Н. А. Азаренковым материалы касательно наследия А. М. Рожкова. После воспоминаний прошлых лет именно Николай Алексеевич предложил на мемориальной доске Алима надпись: СОЗДАНА НАУЧНАЯ ШКОЛА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ». После слов, что в Школе Рожкова (аж!) 28 кандидатов и 3 доктора за 50 лет, все — экспериментаторы, Алексеевич пообещал прислать «список Кондратенко» (Анатолий Николаевич Кондратенко, профессор, доктор физико-математических наук, развивает сложнейшие теоретические исследования ограниченной плазмы). Этот список приводится ниже (см. список 2).

Список 2

	Кандидаты наук	
1.	Фаузи Бен-Хабиб	н. рук. Кондратенко А. Н.
2.	Пенева Й. Х.	н. рук. Кондратенко А. Н.
3.	Азаренков Н. А.	н. рук. Кондратенко А. Н.
4.	Куклин В. М.	н. рук. Кондратенко А. Н.
5.	Ткаченко В. И.	н. рук. Кондратенко А. Н.
6.	Гущин В. И.	н. рук. Моисеев С. С.
7.	Гирка В. А.	н. рук. Кондратенко А. Н.
8.	Загинайлов Г. И.	н. рук. Кондратенко А. Н.
9.	Олефир В. П.	н. рук. Кондратенко А. Н.
10.	Заиончковский В. В.	н. рук. Кондратенко А. Н.
11.	Круша И.	н. рук. Кондратенко А. Н.

12.	Прохоренко Е. И.	н. рук. Кондратенко А. Н.
13.	Севидов С. М.	н. рук. Кондратенко А. Н.
14.	Сидоренко Ю. В.	н. рук. Кондратенко А. Н.
15.	Воробьев В. М.	н. рук. Кондратенко А. Н.
16.	Костенко В. В.	н. рук. Кондратенко А. Н.
17.	Сархадов И.	н. рук. Кондратенко А. Н.
18.	Кавчук В. Н.	н. рук. Кондратенко А. Н.
19.	Гуленко В. В.	н. рук. Кондратенко А. Н.
20.	Дубовик В. Н.	н. рук. Кондратенко А. Н.
21.	Репалов И. Н.	н. рук. Кондратенко А. Н.
22.	Голуб В. Л.	н.рук. Кондратенко А. Н.
23.	Роменский И. В.	н.рук. Кондратенко А. Н.
24.	Остриков К. Н.	н. рук. Азаренков Н. А.
25.	Денисенко И. Б.	н. рук. Азаренков Н. А.
26.	Галайдыч В. К.	н. рук. Азаренков Н. А.
27.	Акимов Ю. А.	н. рук. Азаренков Н. А.
28.	Гущин В. В. (мл.)	н. рук. Азаренков Н. А.
29.	Михайленко В. В.	н. рук. Азаренков Н. А.
30.	Бизюков И. А.	н. рук. Азаренков Н. А.
31.	Павленко И. А.	н. рук. Азаренков Н. А.
32.	Споров А. Е.	н. рук. Азаренков Н. А.
33.	Шишкин О. А.	н. рук. Азаренков Н. А.
34.	Свистун Е. Н.	н. рук. Азаренков Н. А.
35.	Марущенко И. Н.	н. рук. Азаренков Н. А.
36.	Ткаченко И. В.	н. рук. Азаренков Н. А.
	Доктора наук	
1.	Азаренков Н. А.	н. консульт. Кондратенко А. Н.
2.	Куклин В. М.	н. консульт. Кондратенко А. Н.
3.	Ткаченко В. И.	н. консульт. Кондратенко А. Н.
4.	Загинайлов Г. И.	н. консульт. Кондратенко А. Н.
5.	Воробьев В. М.	н. консульт. Кондратенко А. Н.
6.	Круша И.	н. консульт. Кондратенко А. Н.
7.	Гирка В. А.	н. консульт. Азаренков Н. А.
8.	Гришанов Н. И.	н. консульт. Азаренков Н. А.
9.	Бизюков И. А.	н. консульт. Азаренков Н. А.
10.	Остриков К. Н.	н. консульт. Азаренков Н. А.
11.	Денисенко И. Б.	н. консульт. Азаренков Н. А.
12.	Литовченко С. В.	н. консульт. Азаренков Н. А.

Слов просто нет. Вернее, к этому списку, всего несколько слов: фантастическая работоспособность научного руководителя направления Анатолия Николаевича Кондратенко и пожелания долгих лет творческой жизни — А. Н. Кондратенко днями исполнилось 80 лет. Благодарности его многочисленным ученикам и последователям!

Анатолий Николаевич Кондратенко пришел на кафедру в начале 70-х, приглашенный для укрепления научных кадров факультета Георгием Анатольевичем Милутиным, вместе с Владимиром Ивановичем Муратовым и Евгением Ивановичем Луценко.

Евгений Иванович оказался ЭКСПЕРИМЕНТАТОРОМ от Бога. Лаборатории Рожкова и Луценко располагались рядом. Как-то Фареник заглянул к Е. И. спросить совета, как поточнее промерять конфигурацию магнитного поля. Возле входа стоял слесарный столик, порядку на котором позабавлялись бы хирурги, за тисками стоял Е. И. в халате и любовно полировал пастой гои алюминиевую, изогнутую под углом 45 градусов пластину. «Вот, Владимир, собираю осциллограф, это отклоняющие пластины полирую» — буднично произнёс Евгений Иванович. Фареник онемел, медленно развернулся, в прострации заглянул в кабинет Рожкова. Через несколько минут, весело, но без гиканья — электроника тонкая — Рожков и Фареник на заводской тележке с резиновым ходом закатили в лабораторию Луценко громадный осциллограф — пятилучевой, с прекрасными частотными полосами, закрывающими все потребности Е. И., пахнувший заводской краской — (недавно были в Вильнюсе, на приборостроительном, привезли десяток приборов). «Бери, Женя, пользуй» — с рисовкой под щедрого персидского шаха, бесконечно довольный собой, произнёс Алим. Теперь застыл неподвижно, с полировочной ветошью в руках, Евгений Иванович. Не ожидая благодарностей, дарители покинули помещение.

Поездка в Вильнюс для покупки приборов была одним из шагов в процессе поддержки лаборатории А. М. Рожкова, о которой К. Д. просил Толока В. Т. Владимир Тарасович был в дружбе с Ильей Ивановичем Залюбовским, поэтому покупка частично финансировалась из университетского бюджета но и у нас были хозрасчетные сбережения.

Летом 70-го распоряжение А. М. Рожкова: летим в Вильнюс, на приборостроительный завод, к «корешу» по армейской службе.

Такая дальняя командировка для меня была первой. Дома меня серьёзно снарядили: курочка, десяток яиц, бутерброды с колбаской, как оказалось, весьма предусмотрительно.

Самолёт Харьков-Москва-Вильнюс и, к концу дня вылета, мы на проходной завода. Вечером в гостиницу пришел «кореш», пригодилась домашняя снесь.

Два дня по заводу с застывшими гримасами изумления: какая мерилка, блоки питания, управляющие аналоговые комплексы, а у А. М. «добро» на 10–12 тыс. руб. Заводчане связали Михалыча по междугородке с И. И. Залюбовским в Харькове, и мы увозили домой счет на 30 тыс. руб. (шесть «Волг», ребята, Алим был доволен). Вечером я пораньше лёг выспаться, а Михалыч ушел с «корешем» прогуляться.

Утром — самолёт, через два часа аэропорт в Москве. Не помню, куда прилетели, но самолёт на Харьков улетал с другого, необходимо добираться автобусом.

Здесь и начались наши негромкие приключения, в которых Михалыч с блеском проявил находчивость и смекалку. В автобусе к нам подошла кондуктор с целью обилетить. Алим пальчиком попросил её наклониться к нему, что-то зашептал на ушко. Девушка улыбнулась, с интересом глядя на симпатичного мужчину. А мужчина запустил руку во внутренний карман своего пиджака и извлёк из него... ручку, шариковую ручку. Предмет его гордости и интереса мужской части (и не только мужской) факультета. Мало того, что шариковая, с толстой многомесячной ампулой с пастой — невидаль. В центральной части ручки находилась прозрачная вставка, внутри вставки — фигурка женщины в ярком красном платье. При лёгком повороте колпачка платье чудесным образом исчезало и можно было убедиться, что эта женщина не имела привычки носить бельё. Ах! сказала кондуктор, отрывая нам два билета и пряча ручку в билетёрскую сумку.

«Владимир Иванович,» — сказал Михалыч, а так он обращался ко мне только в случаях исключительных — «Мы с корешем вчера слегка погуляли, так что до дома будем экономить.» Алим в поездке «банковал», деньги, для сохранности, хранились у него. За исключением нескольких монет у меня в карманах, экономить нам было нечего. «Нормально, спокойнее будет» — философски ответил я. Часть «тормозка» еще оставалась на дне сумки.

Мы расположились на двух свободных местах в здании аэропорта, до самолёта в Харьков оставалось часов пять. Я по незабытой еще студенческой привычке, сумку под руку, склонил голову на плечо и задремал. «Провинившийся» А. М. охранял территорию.

Растолкая меня «минут через тридцать–сорок, проговорил: «Дома выступишься, давай в нардишки переберемся.» На плоской стороне дорожной сумки, между нами, лежал лист бумаги, разлинеенный характерными треугольниками доски для нард (в лаборатории практиковали в редкие часы досуга), нарезанные квадратики-фишки, и, да простит нас, атеистов, Всевышний, слепленные из хлеба два игральных кубика. От удивления я спросил только, где он ручку взял. Хохотнув, Михалыч показал мою, которую я тоже носил во внутреннем кармане пиджака.

Бросили кости «на ход», пошла игра. Алим был азартен, выигрыш сопровождался неподдельной детской радостью. Я тоже не был лишен азарта, но манера игры у меня была расчетливой, против его — рискованной. Он чаще проигрывал, от чего приходил в полное расстройство.

Играли мы без шума, но флюиды азарта витали вокруг нас. Мимо прошел мужчина характерной кавказской наружности, через несколько минут подошли уже двое. «Ыграете» — спросил мужчина постарше. «Играем, играем» — ответил Алим, занятый сложной комбинацией, и добавил для определенности — «Мы на интерес». Я проиграл партию, тот, что постарше попросил: «Дай мне партэчку сыграть». Я согласно кивнул, встал, прошелся по громадному залу ожидания.

Буфеты манили скромной роскошью бутербродов с икрой и колбасой, пузатенькими киевскими котлетами, шашлычками на деревянных шампурках... Вспомнился зоопарковый «Черный лебедь» с пончиками по 3 и 5 коп. и чаем б/с за 1 коп.

Возвращаясь, я увидел, что наш бивак окружает группа из пяти–шести очень довольных собой симпатичных черноволосых ребят, а среди них сияющий Михалыч. На скамейке между ним и его очередным соперником стояла чуть ли не из красного дерева игральная доска, на ней лакированные чудо-фишки, в руке он нежно, не встряхивая, как должно быть, держал серебряный стаканчик для костей, который благоговейно подносил ко рту. «Ну, где ты ходишь, Володя, я их тут чешу (обыгрываю, слэнг) всех подряд! Садись, поешь.» «Да, куший, маладежь, куший,» — добавил черноволосый и показал рукой на скамейку. Там, в помятой, выдавшей виды и не раз прочитанной газете казали себя миру добрые шматы шашлыка, помидоры, зелень и ломти лаваша. В руке у меня оказался стаканчик для костей, кавказский друг плеснул в него из небольшого деревянного бочонка жидкости. «Каняк, каняк» и своей рукой сопроводил стаканчик мне ко рту.

К посадочной стойке на Харьков нас с Михалычем провожала представительная делегация вновь обретенных друзей, они несли наши сумки, а в свежей газете — абэд на дарожку дарагим друзьям!

Научная тематика у Е. И. Луценко — физика сильноточных разрядов в Z-пинче была уникальнейшей, вернее, на своих пинчах Е. И. обнаружил уникальный эффект отрыва двойного электронного слоя от электрода и его движение! вдоль тела пинча. Поэтому и нужен был многолучевой осциллограф для регистрации сигналов с нескольких датчиков динамики движения слоя. Из-за перепада напряжения в слое падало общее напряжение на разряде, что фиксировалось как повышение сопротивления плазмы пинча. Эффект увеличения сопротивления некоторые московские физики, да и в УФТИ тоже, называли «турбулентным нагревом», по цепочке: увеличение сопротивления — увеличение поглощения внешней энергии-нагрев плазмы. Причиной было названо развитие мощных плазменных колебаний. Запахло открытием, но результаты Луценко упрямо указывали на классическое происхождение эффекта.

Установки у Е. И. были сложнейшими — импульсная сильноточная техника, энергоёмкими — десятки киловатт, тяжелейшими — катушки магнитного поля, силовые трансформаторы. Обслуживающего персонала и самостоятельного финансирования нет.

Алим Михайлович взял творческое шефство над группой Е. И., в частности, заказ из Обнинска по мощным импульсным устройствам выполнялся молодым соискателем Николаем Дмитриевичем Середой и инженером Михаилом Григорьевичем Кривоносом при непосредственном участии Луценко. Но и свою науку Е. И. не оставлял вниманием. Защитил кандидатскую диссертацию Н. Д. Середя. Несколько позже, способнейший студент, аспирант Целуйко Александр Фёдорович, по характеру, экспериментальным навыкам напомилавший Е. И., также успешно выполнил диссертационные исследования на Z-пинче. Николая Середу Фареник в начале 80-х пригласил на должность начальника отраслевой лаборатории, открытой в ХГУ Минэлектронпромом СССР. На усиление группы Е. И. был направлен подававший надежды Александр Анатольевич Бизюков, защитивший кандидатскую диссертацию по скрещенным полям с акцентом на двойных слоях под руководством Е. И.

Метаморфозы науки, научного коллектива. Фареник вспомнил, как много лет назад К. Д. с уверенной надеждой беседовал с Алимом... Алимом Михайловичем. И как пошло развитие направления, третье поколение защит, научные внуки Рожкова.

И грустный конец перспективнейшего направления Е. И. Луценко. Н. Д. Середя успешно, квалифицированно, в тесном творческом контакте с научным руководителем в течение почти десяти лет возглавлял ОНИЛ ДПТП И СКТБ «Контур», А. Ф. Целуйко проявил недюжинные организаторские способности в развитии кафедры физических технологий, основании компьютерного отделения, а, затем, факультета компьютерных наук. Науку Евгения Ивановича продолжать некому. Установки — Z-пинчи не включались, хотя бы «на вакуум», лет двадцать.

Фареник вставил флешку в компьютер перед собой на столе, решил еще раз просмотреть запись телепередачи, в которой декан физ-теха И. А. Гирка рассказывал об исследованиях в области физики плазмы.

В частности, не называя фамилий, упомянул о сильном на факультете в середине 80-х, студентом был и восхищался, направлении: плазменные технологии в микроэлектронике. В те времена только одно подразделение разрабатывало, и довольно успешно, эту тематику — ОНИЛ ДПТП+СКТБ «Контур», начальник лаборатории и КБ к. ф. м. н. Середя Николай Дмитриевич, научный руководитель, доц. Фареник В. И. Славное было время. Хронология тех событий подробно изложена в [2, 3].

Фареник подумал, что надо бы поговорить с Игорем Александровичем и отметить память экспериментаторов, которых с нами уже нет, в частности, Валерия Дмитриевича Афанасьева и Виталия Федоровича Боржковского, бывших в близкой дружбе с А. М. Рожковым.

Фареник задумчиво вглядывался в ведущую передачи Л. Стародубцеву. Не часто жизнь балует сюрпризами познакомиться с исключительной личностью. Успешная телеведущая седьмого канала, доктор философских наук, профессор, заведующая кафедрой медиа-коммуникаций, КМК (и такая в Университете есть, как недавно узнал Фареник) и, очень приятная в общении женщина. После случайно увиденного Фареником фрагмента передачи с Игорем Александровичем, Л. Стародубцева за день–два по его просьбе представила видеокопию. Он начал обращать внимание на объявления в Университете и в фейсбуке с аббревиатурой КМК, их невозможно не увидеть и из-за числа с предложениями разнообразнейших культурологических мероприятий, семинаров, форумов и умелого представления. Белая зависть иногда возникала у него при мысли, не пропустил ли он за семнадцать лет заведования кафедрой физических технологий чего-то существенного.

После организации кафедры в 1992 году за счет НФТЦ, Рожков и Фареник первым вопросом поставили ориентацию на неё студентов.

Размещение НФТЦ и части кафедры на площадях учебно-производственного комплекса Дзержинского района способствовало успешной профорientационной работе.

При участии группы Николая Григорьевича Стервоедова в короткие сроки была развёрнута локальная компьютерная сеть на 20 мест, по настоянию Рожкова, лаборатория вакуумной техники с десятком ВУП-5, которые через министерство Михалыч и «выбил».

Студентам кафедры введены внеаудиторные 4 часа в неделю английского, группой Николая Григорьевича — интенсив по освоению компьютерных технологий: знакомство и свободное пользование внешними сетями, совершенное владение элементами компьютерной вёрстки, мейлами, факсами... Стоп, сказал себе Фареник, это изложено в [2].

В последующие годы:

- организация квалификационного Совета — председатель профессор А. М. Рожков;
- выпуск международного журнала «Физическая инженерия поверхности» (первый в Украине, посвященный и нанотехнологиям, в т. ч.);
- ежегодная международная конференция «Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур» (война с РФ остановила);
- организация подготовки по специализациям «Нанотехнологии», «Ионно-плазменные нанотехнологии и оборудование»;
- участие кафедры вместе с НФТЦ в выполнении работ по Государственной программе развития электроники — с почетными записями в Актах приёмки работ: «Выполнено на уровне мировых стандартов»...

Да, растянуто по времени, физико-техническое образование сродни медицине — сто раз отмерь — как бы продолжая спор с отсутствующим собеседником, подумал Фареник. Это в медиа-коммуникационных мероприятиях, Лидия Владимировна, размышлял он, глядя на экран дисплея, нельзя упустить сенсационность и быстро, быстрее других, пустить новость в радио- или телеэфир. Но и здесь нередко случаются «утки», «фейки», как сейчас говорят.

В одном он себя без обреченности упрекал, не довёл до завершения процесс защиты докторской. Наверное, не доставало рядом Алима Михайловича с его решительным: «Володя, брось всё и доведи до ума!» В 2000-м, автореферат сдал в типографию, на предзащите присутствовало около семидесяти человек (в протоколе отмечено), документы в Совете (до сих пор еще живы). НО! И. И. Залюбовский отправил в межведомственную комиссию по развитию высоких технологий со словами: «Володенька, Университет должен быть на высоте!» Университет был признан Головным по одному из шести направлений в Украине, выделено немалое финансирование, которое надо было ответственно и результативно осваивать. Почти десять лет выполняли, весьма успешно. Руководство работами осуществляли В. И. Фареник и С. В. Дудин.

Сейчас они с Лидией Владимировной виртуально — e-mail, Facebook — при десяти минутах личного знакомства, регулярно общались по вопросу организации после февраля 2016 г. юбилейной телепередачи об Алиме Михайловиче Рожкове. Почерпнуто для дела много, великое благо — иметь дело с талантливым человеком.

Фареник извлек из нижнего ящика стола увесистую папку, неслучившаяся докторская (см. дополнение 5).

В конце 97-го, работа в НФТЦ и на кафедре шла слаженно, выделил я десяток дней на обдумывание своей докторской. С выбором отрасли защиты двух мнений не было — технические науки.

Обязанности руководителя лаборатории и КБ требовали первоочередного внимания к прикладным разработкам, что наложило отпечаток на формальном выражении результатов: изобретения, в каждом из которых я был равноправным соавтором, доклады на отраслевых семинарах и конференциях, публикации в технических журналах обзоров-отчетов.

Заказчики из первой пятерки «силовых» министерств были к нашим работам расположены, но финансирование мы отработывали напряженно. Разобравшись с просьбами о модернизации используемого заказчиками оборудования, я пришел к выводу, а актив сотрудников поддержал меня, что надо взяться за изготовление установок плазменной обработки микроструктур, целиком — от откачки до реакционной камеры. Потребителям пришлось добавить финансирование на комплектацию, но в ответ они получили функциональный ряд оригинального оборудования: «Контур-01» — «Контур-05», серию «Титанов», зондовые датчики оперативного и «стоп» контроля плазменных процессов. Помню, на одном из отчетов, после моего обстоятельного доклада, дотошный главный инженер, листая рекламный журнал фирмы Лейбольд Хераус, спросил, почему у немцев такого не видит. Я ответил ему уничтожающим взглядом, а сосед подвинул ему оглавление нашего отчета, где стройным рядом шли наши А. С., А. С., А. С. «Не для открытой публикации.»

Я не сторонился науки, которой ребята уделяли и внимание, и время свободное. Ответственность за качество разработок была большая, а я — крайний.

Спасибо, Алиму Михайловичу за экспериментальную науку в прошлом, но «главный теоретик» в его группе, и «писатель Пушкин», я без страха и сомнений решительно вмешивался в конструктив строящихся установок и монтируемых приборов. Меня не интересовали типы генераторных ламп и переменных ВЧ-конденсаторов, аналоговые компараторы, тончайшие ротаметры, не знал — спрашивал, не понимал — требовал исчерпывающих пояснений. Главное: минимальный энергозатрат и размер реакционной камеры «в пластину»; минимальная энергетическая цена иона в источнике; однородность обработки не хуже одного процента; 100 процентов выхода годных изделий на плазменных операциях... Сотрудники, скрепя сердце, терпели, т. к., знали, на испытания и сдачу отчета с бригадой я выведу обязательно.

При этом, не могу не вспомнить одного приятнейшего эпизода, когда несколько дней просидел за измерениями с Н. Кропотовым и В. Лисовским. Николай проходу не давал, чтобы я посмотрел их графики с кривой зажигания диодного разряда. Ну, что там нового может быть? И сильно ошибся. При тонкой регулировке давления и ВЧ-напряжения на разряде прослеживалась на кривой зажигания неоднозначность, одному значению давления отвечало два напряжения пробоя с разницей в несколько сот вольт! «Да где же вы раньше были, почему не доложили!» — вспомнил я Алима, Пушкина и классиков естествознания.

Участником экспериментов я был беспокойным. Мы изучили эффект неоднозначности кривой зажигания при изменении расстояния между электродами (меня интересовало минимальное); с разными материалами электродов. в т. ч., с различной электрофизикой; с кремниевой пластиной в разрядном промежутке; при напуске различных газов и, реактивных, тоже; от стабильности разряда в минимуме кривой зажигания в процессе травли функционального слоя; при манипуляциях с устройствами напуска и откачки и прочее. Вывод: эффект есть.

Так я стал соавтором двух пионерских публикаций:

Кропотов Н. Ю., Качанов Ю. А., Реука А. Г., Лисовский В. А., Егоренков В. Д., Фареник В. И. Особенности пробоя газа низкого давления в высокочастотном однородном поле // Письма в ЖТФ. — 1988. — Т. 14, вып. 4. — С. 359–363.;

Кропотов Н. Ю., Качанов Ю. А., Лисовский В. А., Егоренков В. Д., Фареник В. И. Особенности вольт-амперных характеристик слаботочной формы высокочастотного разряда E-типа // Письма в ЖТФ. — 1989. — Т. 15, — вып. 21. — С. 17–21.

А на «Контурах 01 и 03» энергозатрат был понижен почти на порядок!

Тема докторской « Малоэнергетические плазменные системы...» нарисовалась естественным образом, так как мы были в постоянном поиске эффектов, подобных описанному выше, по двум стратегическим причинам.

1. На смену традиционному для микроэлектроники кремнию приходили материалы с более совершенными электрофизическими характеристиками, но легко подверженные деструкции от воздействия высоких температур.

2. Применение плазменных методов обработки позволяло повысить миниатюризацию микроприборов вплоть до суб-субмикронных! (О нано тогда скромно не упоминали). И, надо сказать, понижения энерговклада мы добились и в ионных источниках, и в индукционных реакторах.

Такой выбор направления защиты позволял мне не беспокоиться о составлении конкуренции моим молодым коллегам в будущем.

На 2000-й год: 13 А. С., 8 Патентов Украины и России, около тридцати ваковских публикаций.

Сейчас иные задачи: защита А. В. Зыкова, п р и з ы в к защите Станислава Валентиновича Дудина!

Думали мы с А. М. много лет назад о Школе, защитах, признании?...

...С начала 68-го я — инженер кафедры физики плазмы в лаборатории уже ассистента Рожкова А. М., был переведен на установку «Облако-1». Магнетрон или линза Габора — простое устройство из трёх кольцеобразных электродов, средний — потенциальный, помещавшееся в продольное магнитное поле. Три катушки находились между двумя блинами магнитоактивного железа и создавали сильно неоднородное вдоль оси системы поле. В присутствии плазмы картина полей была сложнейшей: электрическое радиальное и продольное, магнитное, резко спадающее по оси от центра. Собственно плазма занимала небольшую часть устройства у центрального электрода, плотность ее резко спадала к «земляным» электродам. Вопросов о сложности системы не принято было задавать, сказано — меряй! Я спрятал свобододобивый характер и неуместное любопытство под лабораторный халат и «мерял».

Предмет измерений состоял в том, что при определённом соотношении напряженности магнитного поля и напряжении на центральном электроде, электрическими зондами (вспомнилось, как К. Д. на лекциях произносил — зонд Лэнгмюира) фиксировались колебания в плазме, по характеристикам напоминавшие ионно-циклотронные. Эффект был тонкий, постоянно, как нам казалось, из-за неоднородности плазмы ускользающий. Накладывались колебания с иными частотами, «лезли» гармоники.

У меня на языке вертелся вопрос, что мы упёрлись в эти циклотронные колебания, я его не задавал, а позже, после очередного визита Толока В. Т., понял, правильно, иначе показал бы свою дремучую неграмотность в вопросах нагрева термоядерной плазмы. Владимир Тарасович пришел с новым для меня человеком — Виктором Афанасиевичем Супруненко. С Михалычем они были знакомы: привет, Витя, здорово, Алим. Суть разговора: природу колебаний типа ионно-циклотронных, их зарождение, характеристики, энергетику ионов при этом — изучать доскональнейшим образом. Сейчас за бугром, а у нас Швеиц О. М. пытаются греть плазму на ионном циклотронном резонансе.

«И это на осциллографе ОК-17М» — не преминул заметить Михалыч. «Поможем!» — был ответ.

Оперативно помогли друзья — радиофизики, Свич Василий Антонович, давний «кореш», как представил А. М. симпатичного чубатого крепкого мужика. Свич В. А. предоставил нам панорамный широкополосный радио-спектроанализатор, буквально, открывший нам глаза на спектральные характеристики РЦН. Работа шла, Виктор Афанасьевич теперь был частью и, надо сказать, весьма полезным гостем.

В начале осени 69-го из деканата поступило распоряжение: срочная передислокация в Пятихатки, в новый корпус ФТФ.

ДЕМОНТАЖ!

Группа А. М. Рожкова к этому времени: Алим, я, инженер Власов Вячеслав Васильевич, дипломировался у А. М. вместе с Пикулем Михаилом Ивановичем, защитили дипломы в 1968 г., лаборанты Михаил Кабыченко, Михаил Кривонос, дипломник Юра Якимчук. Похаживали регулярно в лабораторию студенты Миша Сосипатров и Саша Кожарин. Пикуль М. И. после защиты уехал в Минск. К снежной зиме 70 года оборудование в разобранном виде разместили по заранее определённым помещениям.

МОНТАЖ!

Задача Алимом Михайловичем была поставлена конкретно: в феврале принять студентов на лабораторном практикуме по диагностике. «Метода» — работать днём и ночью. Снабжение комплектацией — ХФТИ, благо, теперь рядом. Фареник отвечает за «коаксиал» (пушка Маршалла, дипломная работа), Власов — «коничка» (индукционный импульсный источник плазмы). Со свойственным А. М. юмором на коротком совещании группы им было заявлено: «Все капризы Володи и Славы, вплоть до кофея в постель, выполнять, как мои! Срок запуска — первое марта!» Конечно же!, срок был абсолютно! нереальным!, невозможно! выполнить!!!...

Неоднократно я потом вспоминал умение Михалыча зарядить на длительную результативную работу «ВНАТЯГ», не ослабляя моральных построшков (тяжело будет тронуться с места). И, когда с Мишей Сосипатровым и Мишей Пикулем неделю не выходили из лаборатории в Минске, выполняя срочный заказ известного «Интеграла». И на двухмесячной вахте в НИИ «Ангстрем» (завод союзного значения в Зеленограде «стоял на ушах»), а наши «мамка» Алик Лукашевич потчевал бригаду домашним борцом, сваренным в трёхлитровой банке кипятильником...

Запустили.

Последние концы (без напряжения, ТБ) подбирали уже со студентами, в рамках НИРС! Из них потом несколько человек стали нашими сотрудниками.

Алим Михалыч в это время и был рядом, и в ХФТИ решал вопросы с комплектацией. Отвлекали его и неотложные, осложнившиеся до крайности, отношения в семье. Мы с душевным пониманием успокаивали, там же сын, ребятки, с болью делился А. М.

К концу марта мы со Славой Власовым пригласили Михалыча в соседнюю с практикумом комнату, научную, которая, по определению, должна быть необитаемой. Там стояли в полусобранном состоянии «Облако1» (моё) и будущее «Облако2» (Славино). «Когда???» — только и выпалил Рожков. Находчивый Слава Власов ответил: «Между днём и ночью, Михалыч». В дверях стояли скромно сияющие Сосипатров и Кожарин, Кабыченко и Кривонос.

Кстати, в этом аврале, как нередко бывает, по случаю, был сделан серьёзный физический и технический, короче, физико-технический шаг.

Одним из элементов конструкции магнетрона Габора был накаливаемый катод, который при частом развакуумировании установки насыщался кислородом воздуха и перегорал. Замена его на «Облаке 1» отнимала день, еще несколько часов «тренировка», обезгаживание, потеря темпа. Во включенном состоянии из оргстеклового фланца установки лился яркий свет, как от мощной лампочки Эдиссона.

В этот раз, пожалев время на тренинг катода, я получил плазму, приступил к измерениям. Свет в установке внезапно погас, стрелка амперметра «Накал катода» упала к нулю. Не трогая ручек регулировки, решил заглянуть внутрь камеры. Там достаточно ярко голубоватым цветом сиял слегка подрагивающий цилиндр. Позвал А. М., вдвоём мы поизучали это явление визуально. «Самостоятельный разряд?» — сказали мы друг другу одновременно. «Азот» — добавил Алим, а я перешел к ручкам управления напряжением и магнитным полем. «Полегче» — понял Михалыч мои намерения. В каких-то диапазонах

изменения цилиндр менял форму, оттенки свечения, потом погас. На все манипуляции ручками управления вакуумная камера отвечала темнотой.

Задача нам с Михалычем была понятна и звучала она так: как зажечь самостоятельный разряд в скрещенных полях? «Решай!» — Алим был краток. «Или ставь новый катод.»

Я не стал вычислять пропорцию между прогрессом и основной его движущей силой, открыл Грановского. Короткий раздел о ячейке Пеннинга. Кривые зажигания. Стоп, недавно в ЖТФ попалось похожее, Смирницкая, Рейхрудель. Движущая сила прогресса погнала меня в библиотеку. Через пару часов меня там нашел Михалыч. «Ну, что?» «Алим, тут люди науку серьёзную построили, в МГУ. Эшелон публикаций в ЖТФ.»

К вечеру я демонстрировал Алим самостоятельный разряд, манипулируя анодным напряжением, магнитным полем и давлением остаточного газа, понастроив для удобства семейство кривых зажигания разряда. «Это хорошо, без катода, но...?» «Понял, Михалыч. Сравнить по максимуму характеристики РЦН с катодом и без.» «И доложить немедленно!» — проколотал он. «Бу сделано, Алим Михайлович!» — как много лет назад ответил я, но уже в лицо уважающего тебя друга.

Несколько дней мы с Мишей Сосипатровым в стиле «экспресс» промеряли амплитудные, частотные характеристики резонансной ионно-циклотронной неустойчивости, гармонические спектры, энергетiku ионов и т. д. в бескатодном режиме. На устроенном срочном семинаре доложили результаты: все вопросы — а это?, а то?, неоднородность по радиусу?, прианодный электронный слой? — получили удовлетворительные ответы. Выбор сделан в пользу самостоятельного разряда. При работе с ним необходимо было находиться в области параметров, охватываемой кривой зажигания.

Кроме монтажа установок, проводили мы и самостоятельные строительные работы: новое здание — дверь перевесить, линолеум под установками усилить, перегородку дополнительно построить. О ней, перегородке, и пойдёт речь.

В коридоре, отведенном под лабораторию Рожкова, наличествовал расширитель для поступления света и воздуха в тупиковую часть. Как-то Алим Михайлович прошел по этому закутку, метров пятнадцать квадратных, хозяйским шагом. «Здесь будет кабинет директора программы», — постановил А. М.

Этого титула его удостоили на неофициальном совещании лаборатории, а он, уже как директор, за неоспоримые инженерные способности определил Славу Власова главным инженером, а меня, смех и только, главным теоретиком, т. к. в стройной картине РЦН-эффекта, составленной большими учеными, обнаружил я серьёзную неувязку теории с экспериментом: задержали отправку статьи, «перемеряли» тьму кривых, ученые поизучали новые результаты, откорректировали картину, признав мою правоту, а мне присвоили такой вот титул.

Сказано — за работу. Умельцы Власов, Кривонос, Кабыченко под руководством Директора составляли блиц-проект перегородки, я с аспирантом из Алжира Феузи был отправлен «на канавы», подвозить кирпич от общежития к запасному входу в корпус факультета.

К концу второго дня здоровых физических упражнений, на очередной «ходке», прибежал запыхавшийся Кривонос. Волнуясь, он частил в разговоре, сейчас он изъяснялся слогами — высшая степень. «Короче, Дыректор, срочно! разыскивает Фареныка!» «Где ты ходишь, Володя?» «На канавах, Алим Михайлович.» «Какие канавы?!» «С гражданином Алжира Феузи Бен-Хабибом, вашим аспирантом, таскаем кирпичи», — отвечал я, радуясь короткой передышке. «Какие кирпичи, многоточие!, какие канавы, два многоточия!», а отчет в Обнинск кто писать будет? строка точек, Пушкин, что ли?» Не скажу, любил ли он поэта, но фамилию упоминал часто, как правило, с многоточиями. Обсудили. По планам отчет

нужен был месяца через полтора, но из Обнинска просят побыстрее, завал с основной темой, выручайте, харьковчане! «Месяц!» — твёрдо заявил я. «Две недели! Фотографиями займётся Слава.» — был ответ.

Дело написания научно-технических отчетов в лаборатории я, по сути, взвалил на себя сам. Писал я легко, но стиль изложения подобной информации у меня был «вязкий», как оказалось, трудно поддающийся правкам. Был случай, Михалычу не понравился оборот, он его «выдернул», за ним потянулся следующий, дальше-больше и из клубка отчета образовался ворох неприбранной пряжи. Заказчикам, как признался один из них, эти отчеты нравились своей «кирпичностью», хорошо монтировались в полный отчет. На том Директор и постановил — главный теоретик и, он же, «писатель Пушкин».

Через три недели мы с Николаем Середой подходили к зданию подмосковного обнинского предприятия-заказчика. В портфеле: акты приёмки-сдачи работ, отчёт в двух экземплярах, пахнущих ледерином и столярным клеем (вечером, перед отъездом в Москву, Михалыч переплетал собственноручно, п о к а з а т е л ь н о, нравилось ему это ремесло и получалось отменно), а также три «экземпляра «Гарилки три перца», как называли подмосковные (и московские тоже) коллеги нашу горилку з перцем.

Спустя два дня (дни приезда и отъезда — один день) я был у кабинета Директора с докладом. Н. Серeda — в НИС ХГУ, сдать Акты. Свеже покрашенная перегородка с обитой дерматином дверью радовала глаз. Рядом собралась чуть ли не вся лаборатория, но не возгласы радости наполняли коридор, а сплошные междометия и многоточия... Перед дверью стоял громадный двухтумбовый стол, выданный Директору и принесенный в наш коридор еще до начала стройки. «Готовитесь к приему моего доклада, Алим Михайлович» — невинно поинтересовался я, сразу поняв причину коллизий (не проходил стол в дверь, а затащить ранее не догадались, стоял же в коридоре!). Директор ответил парой многоточий, упомянув, кроме Пушкина, целый ряд классиков естествознания. «Ребята, через час-полтора всё будет на месте», — уравнивал беседу Миша Кривонос.

Через пару часов он же заглянул в лабораторию: «Иды до Дыректора, Володю, разобрали и собрали уже стил». Директор сидел за столом и делово перебирал бумаги. «Разрешите докладывать, товарищ Директор» — обиженно рапортовал я. «Садись, Иванович, остынь, не упираться с докладом. С утра звонили из Обнинска, довольны, как слоны, и даже больше. Предлагают продолжить работы, повысить надо мощность импульса. Финансирование по Постановлению, как Жора говорит, ЦК и Совмина. Отлично вы с Колей представили результаты, убедительно. Подумать надо крепко.» — он мельком посмотрел на стену, где уже висела приколотая кнопкой любительская фотография К. Д.

Я понял, что хоздоговорного приработка не будет. Только в р а щ а ю щ а я с я плазма. «Жене Луценко предложу, если возьмётся, установку от предыдущей работы передадим ему...»

Только ROTATING PLASMA!

В конце 1977 года, после Всесоюзной конференции по горячей плазме (г. Харьков, Старый Салтов), видя моё неуёмное стремление к самостоятельным действиям, обещавшие развитие новой тематики в ближайшем будущем контакты с московским НИИ Вакуумной техники, оценив начавшееся хозрасчетное финансирование от москвичей, и, ГЛАВНОЕ, определив, что предполагаемое дело находится в русле проблемы «Плазма в скрещенных полях», Алим Михайлович вызвал меня «на разговор».

Михалыча отличало удивительное чутьё к тонким нюансам развития данного научного направления, обострённое чувство наступления насыщения в поиске новых решений и задач. «Нулевая производная — конец науке, ни дня без открытий,» — говаривал А. М. в шутку, а мы не всегда понимали, где у него эта шутка заканчивается.

«Был у меня недавно Валентин Глебович Падалка. Обратил он внимание на результаты наших с Юрой Якимчуком исследований тонкой структуры РЦН, где амплитуда ионно-циклотронных колебаний по радиусу расщепляется на два близких пика. Мы оценивали по частоте — азот и кислород. Глебович, умнейшая голова, увидел здесь возможность разделения по радиусу близких по массе частиц. К примеру, выделение кислорода где-нибудь... на Луне. Вакуум есть, порода... Не дёргайся, Иванович, на Луну еще не скоро. А сепарация изотопов для атомной промышленности, разделение отходов ядерных реакторов — это задача для «Большого Пеннинга», как научно-технологического модуля с вращающейся плазмой.»

В этой фразе А. М. меня поразила не Луна — эка невидаль в лаборатории Рожкова, не постановка, по сути, новой задачи изучения процесса сепарации — назревало. Эффектность, что не было чуждо Михалычу, изящество, глубина и ёмкость понятия и ещё многое, что было вложено в слова «...НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ модуль» — неизгладимо вошли в моё сознание! Фанатичный приверженец горячей ВРАЩАЮЩЕЙСЯ плазмы, Алим сумел в этом определении соединить и мои рассказы о плазменных технологиях в микроэлектронике с применением ЕН-устройств, и информацию о набиравшей силу технологии «Булат» в УФТИ, и сохранить глубочайший пиетет к поставленной великим К. Д. задаче: научно-технологический модуль с вращающейся плазмой.

Пока я «пережевывал» сказанное, Алим, точь-в-точь, К. Д. и инженер-конструктор Рожков много лет назад, посмотрел на меня и продолжил. «Я на конференции несколько раз беседовал с Фомичём (Геннадий Фомич Ивановский — нач. отдела 41 в НИИ Вакумной техники, главный конструктор новой техники в Минэлектронпроме СССР). У них широко используются системы со скрещенными полями. Ты успешно докладывал в отделе результаты работ нашей лаборатории, и на защите Миши Пикуля он своими глазами видел наши установки. Помнит ваш доклад с Пикулем в 75-м году на конференции по НТ плазме, когда вас Белевский из «Кристалла» учил жизни. Нас он зауважал. Конкретно, к тебе он — с доверием и планами на сотрудничество. Обещает содействие в Министерстве в открытии отраслевой лаборатории для нас, ПОД ТЕБЯ. Думать не предлагаю! Ответа не спрашиваю! Поезд трогается, садись! С заведующим кафедрой я говорил, отдаём тебе двести первую комнату, около ста квадратов и двадцати тонн беспорядка. Работать денно и нощно, ты к этому приучен. Юнаков, Крячко, Бизюков, студенты. С Власовым и Покроевым побеседуй. «Облако-1» заберёшь, кой-какие приборы, а так — раскручивайся сам, финансирование есть, Фомич еще обещает заказы. Через год Фомич приедет посмотреть, как обустроилась будущая отраслевая лаборатория. Вот так, Владимир Иванович. А я с бригадой — на большом и маленьких Пеннингах «ударю» по разделению во вращающейся плазме.»

Время между принятием решения и началом его реализации у А. М. было минимальным. «ЗАВТРА НАЧИНАЕМ!»

Подробная хронология работы «моей!» группы изложена в книге [3].

Не об этом сейчас речь.

Работу группы Алима Михайловича не было у нас времени созерцать, но темпы поражали...

Фареник подумал, что, с одной стороны, квалифицировать успешность многообразной научной деятельности количеством защищенных диссертаций несколько однобоко, но с другой — если диссертация есть квинтэссенция многолетних усилий, суточных вахт возле экспериментальной установки, кип бортовых журналов и альбомов (стопка миллиметровки, две полоски текстолита, всё скреплено двумя болтами М4) графиков, гор перечитанной литературы, семинаров до хрипоты, изящного пинг-понга на конференциях,

как это было в группе Рожкова, а за ним — и в группе Фареника, то это устойчивая, конвертируемая в успехи и признание ЕДИНИЦА оценки эффективности этой самой деятельности.

«И, опять же, не так стройно вытанцовывается» — мысленно покритиковал свои размышления Фареник.

Группа Е. И. Луценко, о ней он уже вспоминал, «защитила» «только» четыре кандидатских диссертации по тематике Z -пинчей, но оставила заметный фундаментальный след в физике сильноточных разрядов — эффект отрыва двойного электрического слоя от электрода и его движения вдоль пинча. Необъятное поле классической физики для возделывания, если бы исследования были продолжены.

Владимир Иванович Муратов продолжал исследования по плазменной электронике, начатые им в УФТИ под руководством В. Т. Толока. Результаты нескольких работ, выполненных им вместе с Филиппенко В. Е., вошли в цикл по пучково-плазменным взаимодействиям, удостоенный в середине 70-х Государственной премии УССР. А числом защит группа не отличилась.

Негромко, но уверенно защитили кандидатские диссертации сотрудники кафедры Ю. Елисеев и И. Гордиенко под руководством К. Н. Степанова, а В. Д. Егоренков — докторскую при консультативном руководстве Константина Николаевича. Все — по животрепещущим вопросам горячей плазмы. (см. дополнение 7)

Упомянутые выше работы выполнены по специальности 01.04.08 «Физика плазмы».

Однако...

Уже в апреле 1979 года (!) Миша... Михаил Васильевич Сосипатров представил диссертацию на тему: **«Экспериментальное исследование разделения и вывода элементов и соединений во вращающейся плазме при развитых неустойчивостях»**. Успех. В скором времени закрытую работу по разделению на «Большом Пеннинге» представил А. Маслов.

Защитил закрытую докторскую сам Алим Михайлович с элементами разделения специальных материалов.

Прошла череда из 6 защит кандидатских диссертаций за последующие десять лет по различным аспектам исследований плазмы в скрещенных полях: Ю. Якимчук, В. Бориско, И. Битная, А. Лучанинов, И. Середя, Н. Петрушеня.

С 1985 года, после организации в 1979 году Отраслевой научно-исследовательской лаборатории диагностики плазменных технологических процессов и разворачивания, становления, вслед за прикладной, научной тематики, «защитную» лепту начала вносить группа Фареника.

Н. Юнаков подготовил диссертацию, в которой наряду с исследованием процессов во вращающейся плазме, скажем так — классического — разряда Пеннинга, приведен немалый объем результатов изучения физики ионных источников типа Радикал «Холодок», многоячеистый широкоапертурный, «Луч» с накаливаемым катодом и холодный. В числе публикаций — несколько изобретений.

А. Бизюков представил работу по изучению свойств нескомпенсированных слоёв плазмы в E/H -полях разряда Пеннинга, в холловских ионных системах. Чувствовалась опытная рука специалиста по электрическим слоям — научного руководителя диссертации Е. И. Луценко. Пионерский результат — изобретён способ подавления электростатической неустойчивости в ускоряющем промежутке ионного источника, что сказалось на энергетике пучка.

Сотрудничество с Константином Николаевичем Степановым по вопросу ион-ионной неустойчивости в E/H -полях позволило группе Рожкова внести существенные коррективы в механизм разделения, в ОНИЛ — значительно улучшить спектральные

характеристики ионных пучков. А, вкуче, А. Зыкову — предложить кафедре изящную работу, в которой имелись и серьёзная теоретическая модель, и крепкий эксперимент.

Работа Н. Марущенко о процессах переноса заряженных частиц поперёк направления магнитного поля положила начало исследованиям процессов объёмной и зарядовой компенсации.

Работы С. Дудина, открывшего новую ветвь направления исследований разрядов и ионно-плазменных систем в сложнейших комбинациях магнитных и электрических полей, А. Ушакова, К. Положия, Д. Рафальского, ввиду их чрезвычайной важности и новизны, требуют отдельного повествования.

Это же необходимо сказать и о цикле работ В. Лисовского вместе с С. Яковиним, Н. Харченко, В. Коваль, открывших интересную, полную научных неожиданностей страницу разрядов в комбинациях электрических полей без внешнего магнитного поля.

Диссертационные исследования Ивана Бизюкова и Андрея Кашабы были выполнены на оригинальных устройствах со скрещенными E/H -полями, успешно разработанных в научной группе Александра Анатолиевича Бизюкова.

Вызов по внутреннему телефону: «Владимир Иванович, к вам Редванский Виктор Михайлович.» «Виктор, заходи» — вышел в приёмную Фареник. «Спасибо, Витюша, что пришел. Мне только что звонил Владимир Борисович Юферов, они интенсивно используют наш «Большой Пеннинг», под названием ДИС-1. Его материал я тоже включаю в статью (см. дополнение 1). Ты — подарок для концовки статьи об А. М. Последний его соискатель и с наиболее законченным комплексом результатов. Садись, пожалуйста, и, как на защите, кратко и полно расскажи основные достижения.»

«Иваныч, — обратился ко мне Виктор, — я принёс с собой автореферат, заключение и выводы диссертации. Может, используешь в статье. Всё выверено, взвешено, без воды. Алим каждое слово отслеживал.» «Хорошо, Виктор Михайлович. Я в тексте старался не нагружать будущего читателя сухим научным материалом. Считаем, ты дал добро на использование своей рукописи, это будет прекрасный заключительный штрих в истории разделения 70–80-х» ответил Фареник и взял в руки автореферат (см. дополнение б).

«Прекрасно, Виктор, отличное завершение статьи Алимовым «ВСЕМ». А когда защита случилась, в реферате бледно месяц написан.» «Иваныч, я не помню точно, я уже оформлялся на новое место работы, свистопляска, бизнес открывал, ты же помнишь, какое время было. Кажется ноябрь, ноябрь девяносто первого.» Виктор попрощался и ушел.

Фаренику ОБОЖГЛЮ! сознание.

Конец 1991 года, ноябрь девяносто первого. Оказывается, жизнь продолжалась. Люди до самозабвения воспитывали детей, разводились и играли свадьбы, били горшки и мирились, глубоко дышали харьковским воздухом, создавали успешные бизнес-проекты, защищали прекрасные диссертации. Жизнь продолжалась!?!...

Одна тысяча девятьсот девяносто первый год, ноябрь! Я возвращался из Москвы харьковским поездом, как всегда, в десятом «бригадирском» вагоне, был ли у меня билет или я вскакивал на подножку уже трогавшегося поезда, я слышал неизменное «Привет, Иванович! Домой!?!» или «В Москву?!» Результат регулярных вояжей в столицу, не «жлобского» характера и наличия знакомого заместителя начальника вокзала.

Сегодня я был с билетом, молчалив, хмур, опустошен. На приветствие бригадира коротко кивнул. Через час езды, после завершения своих оргдел, он зазвал меня в радиорубку, закрыл дверь. «По пятьдесят, сумрачный ты, Иванович.» Я отрицательно кивнул. «А по шестьдесят?» Я хмыкнул, на том и порешили.

...За день успел побывать в родном министерстве, двух отраслевых институтах, позвонить нескольким друзьям-коллабораторам. Пустые, стеклянные глаза при встречах

и односложные ответы в телефонной трубке. В министерстве старый знакомый вышел ко мне на проходную, вывел на улицу. Зашли в кафе по соседству. Он заказал два по сто коньяка. Молча чокнулись, выпили. Я ответил заказом. Молча чокнулись, выпили. «С союзными республиками отношения прекращаются, все работы по Постановлениям отменяются. Прощай, Володя.» И ушел. Я меланхолично жевал корочку лимона...

Остаток дня до поезда прошел в фантасмагории. Люди вокруг — сплошь клиенты картинок Босха и полотен Бидструпа. Хроника событий то застывала в стоп-кадре, то мчалась с калейдоскопным шорохом. Все московские девушки были ур-родками, а рекламные щиты — картинами великих мастеров. И только звучащий в голове ВЫСОЦКИЙ был настоящим... «... в гости к Богу не бывает опозданий. так что ж там ангелы поют такими злыми голосами..., что-то воздуху мне мало, ветер пью, туман глотаю, чую с гибельным восторгом — пропадаю, ПРОПАДАЮ!»

Утром следующего дня ко мне в двести первую пришел Михаил Сосипатров. «Иваныч, Алим приглашает, поговорить надо.» Михалыч стоял у окна, задумчиво изучая скудный пейзаж заднего двора физтеха: кунги, стоящие кое-как. сарайчики-схованки, громадные катушки от силовых кабелей. Повернулся, сделал несколько шагов навстречу. «Я из Москвы, Владимир Иванович. Был в Госкомитете, средьмаше. Мои программы по разделению остановлены.» Рукопожатие было вялым. «Я тоже, Михалыч, оттуда же. И у нас остановлены. А мы уже на суб-субмикронны вышли...» — начал я и осёкся.

У железного А. М. Рожкова в глазах увидел я глубочайшую РАСТЕРЯННОСТЬ! Рука моя сама собой от рукопожатия легла ему на плечо жестом поддержки. Он молча ответил. Миша Сосипатров отвернулся к окну.

Мы молчали. Нужны ли слова между настоящими мужиками...

Фареник прошелся по кабинету. «Но рук мы не опустили!» — с некоторой гордостью и без рисовки даже перед самим собой подумал он.

...Мы оперативно перегруппировали силы.

Поредешую группу А. М. включили в состав моей, тоже потерявшей нескольких сотрудников, лаборатории отделом под водительством М. В. Сосипатрова.

Финансирование от МВССО УССР, с которым я во все времена продолжал поддерживать контакты (благословенный Алексей Федосеевич Рева, нач. отдела спецработ, понимавший с полуслова замминистра Шепотько Виктор Пантелеевич, дорогие коллеги и друзья), позволяло продержаться до полугода на целых ставках.

Алим взял на себя немедленное установление связей с Академией наук (В. Г. Барьяхтар), я — составление единой и расширенной программы по новым технологиям, интересной для Украины и Университета.

Для глубокого информационного поиска наметил себе срочные поездки в Минск и Москву.

Неожиданно позвонили из Ленинграда, со «Светланы». Заказ и деньги. Заеду и туда. Очень ко времени.

Коллектив продолжал ранее начатые работы.

Рожков и Фареник, объединив усилия, быстро релаксировали после тяжелейших потрясений. Действовали согласованно, стремительно, решительно, ставя четкие осмысленные цели, р е з у л ь т а т и в н о. Оба безусловные, харизматичные лидеры, они работали, как отлично отлаженный механизм.

Уже с начала 1992 года были:

– и победоносное завоевание блистательным А. М. Рожковым Министерства образования Украины, руководство Министерства считало честью приветствовать профессора-ядерщика А. М. Рожкова;

- и подготовка феерической Программы по новым технологиям, полностью поддержанной вице-президентом Академии наук В. Г. Барьяхтаром и В. В. Козорезом, зам. министра образования;
 - и основание уже летом 1992 года Научного физико-технологического центра -НИИ двойного подчинения МО и АН Украины, директор В. И. Фареник;
 - и организация в августе–сентябре 1992 года в структуре Университета новой кафедры физических технологий, заведующий А. М. Рожков;
 - и, тогда же, Учебно-научного комплекса «Физических технологий»;
 - и, в конце 1992 года, поездка А. М. Рожкова в США, по приглашению и за счет американских ученых;
 - и...!
- Но это уже «СОВСЕМ ДРУГАЯ ПЕСНЯ», как говорил Алим Михайлович Рожков.

ЛИТЕРАТУРА

1. От редколлегии «К 40-летию начала исследований в области плазменных технологий в микроэлектронике на физико-техническом факультете Харьковского университета», из воспоминаний В. И. Фареника // ФИП. — 2015. — Т. 13, № 2. — С. 276–281.
www.pse.scpt.org.ua
2. Презентация к 20-ти летию кафедры физических технологий ХНУ имени В. Н. Каразина www.scpt.org.ua, см. информацию от 03.07.2012.
3. Из книги «Харьковскому физтеху 50 лет» Власов В. В., Гирка И. А., Азаренков Н. А., Ходусов В. Д. — Х.: ООО «Издательство Майдан», 2012, статья В. И. Фареника «Подготовка научных кадров для новых областей физики». — С. 65–73.

Р. С. После получения последней корректуры этого материала — не осмеливаюсь определить его жанр, доставившего много хлопот мэтрранпажу редакции, решил указать период его (материала) подготовки. Начинать в октябре прошлого года с целью зафиксировать коротко серьёзное, с моей точки зрения, событие, которому пришлось быть случайным свидетелем: 50-летие встречи академика К. Д. Синельникова с инженером-конструктором физ-теха А. М. Рожковым, на которой была поставлена задача исследования свойств вращающейся плазмы. По мере изложения фактов, сюжет разрастался. Хотелось понять, почему А. М. Рожкову поручил К. Д. воплощение этой идеи, как он смог открыть для себя неординарность недавно вернувшегося со службы в армии отставного капитана. Приблизился февраль 2016-го, 80 лет со дня рождения А. М. Решили с руководством факультета открыть мемориальную доску, назвать его именем работающую лабораторию.

Странная субстанция человеческая память. Какие фильтры стоят на потоках значимых событий, их причинно-следственной связи? Встреча К. Д. и А. М. повлияла на судьбы многих десятков людей, но, когда я пытался определиться с этой частью материала, почти всегда слышал в ответ: «Сколько? Пятьдесят? Не может быть. Надо же.» Седьмого февраля созвонился с Мишей Сосипатровым, гриппует. Я тоже. В этот раз проведать Алима Михайловича не поехали. С Виктором Редванским и Олегом Давыдовым постучали символически по микрофонам трубок. Большие и звонков не было. А... Память в делах. Помним, Михалыч!

Начато: октябрь 2015 г.

Закончено: февраль 2016 г.

Информация получена от доктора физико-математических наук В. Б. Юферова, ННЦ «ХФТИ». Приводится без изменений. Исключены фото копий Акта и Приказа о запуске установки «Орбита», как трудно воспроизводимые.

Рожков А. М. Воспоминания

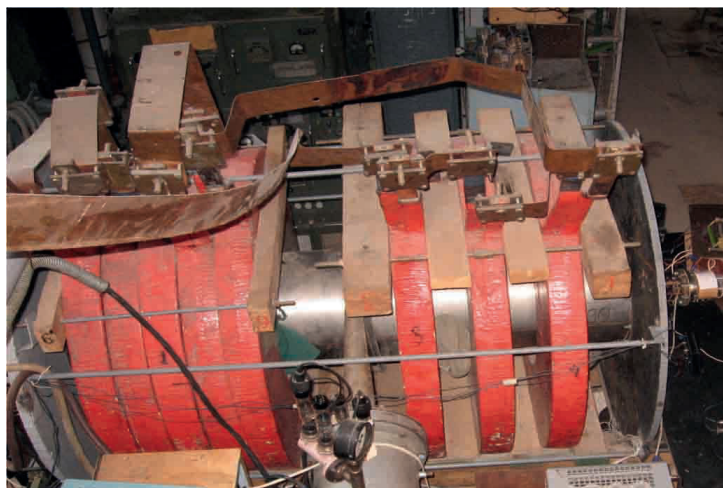
В ХГУ в 60–80 гг. в научном коллективе, возглавляемом А. М. Рожковым, и под руководством проф. К. Н. Степанова проводились работы по исследованию различного типа неустойчивостей во вращающейся плазме, в частности, исследование резонансного возбуждения ионно-циклотронных колебаний в плазме, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях (Резонансное возбуждение ионно-циклотронных колебаний в плазме, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях / А. М. Рожков, К. Н. Степанов, В. А. Супруненко, В. И. Фареник, В. В. Власов // УФЖ. 1969, т. 14, № 11, 1856 с.)

Кроме того, исследовалась возможность разделения по массам смесей изотопов, элементов и соединений, находящихся в плазменном состоянии (А. С. № 714997 СССР. Способ разделения по массам смесей изотопов, элементов и соединений, находящихся в плазменном состоянии / В. В. Власов, И. И. Залюбовский, М. Г. Кривонос, А. М. Рожков, М. В. Сосипатров, К. Н. Степанов, В. И. Фареник (СССР) — № 2607845 // Заявлено 19.04.78. Опубликовано. 15.10.1979.)

Для проведения экспериментальных работ использовалась установка «Орбита», созданная А. М. Рожковым (см. Акт и Приказ). Результатом данных исследований стал выход множества научных статей, публикаций, изобретений и диссертационных работ.

В 2004 году установка «Орбита» была передана в ННЦ ХФТИ, где была модернизирована и получила название демонстрационно-имитационный сепаратор («ДИС-1»).

Общий вид установки «ДИС-1».



В настоящее время «ДИС-1» используется для исследования принципов сепарации многокомпонентных смесей, имитирующих отработанное ядерное топливо (ОЯТ). С тех пор и по настоящее время на установке «ДИС-1» ведутся экспериментальные исследования, и опубликовано более десятка научных статей, в частности, в журнале ВАНТ (Вопросы атомной науки и техники), которые включают ссылки на работы коллектива, руководимого тандемом А. М. Рожков — К. Н. Степанов.

В. Б. Юферов.

Аннотация автореферата диссертации В. Коваль-Деревянко
«Структура и свойства разряда постоянного тока в длинных трубках»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физ. -мат. наук в 2015 году.
Печатается с разрешения автора

В диссертационной работе исследованы зажигание тлеющего разряда в коротких и длинных трубках, осевая структура, а также процессы в катодном слое и положительном столбе. Показано, что обычный закон Пашена справедлив только для коротких разрядных трубок, для которых $L/R < 1$. Получено, что при больших отношениях $L/R > 10-20$ кривые зажигания с ростом L смещаются в область более высоких пробойных напряжений при практически неизменном давлении газа в их минимуме. Проведен асимптотический анализ критерия пробоя и получена формула для давления газа в минимуме кривой зажигания в длинной трубке, которая хорошо описывает результаты. Зондовым методом обнаружено, что в темном фарадеевом пространстве осевой профиль плотности плазмы имеет максимум, который может быть даже выше, чем средняя плотность плазмы в положительном столбе. Выяснены условия стратификации положительного столба тлеющего разряда в постоянном электрическом поле в азоте в трубках с различными радиусами. Получено, что стратификация положительного столба хорошо описывается законами подобия, а приведенные толщины страт d/R — законом Гольдштейна-Венера $d/R = C/(pR)^m$, при этом константы для азота равны $C = 1,05$ и $m = 0,32$. Найдено, что область существования контрагированного режима в CF_4 в узких зазорах между электродами имеет неоднозначный характер, увеличение разрядного тока может привести к расконтрагированию положительного столба. Установлено, что для давления азота $p < 1$ Торр и $p > 1,5$ Торр характеристики катодного слоя хорошо описываются столкновительным законом Чайльда-Ленгмюра с постоянной подвижностью ионов.

Содержание и Заключение диссертации В. А. Лисовского, представленной на соискание ученой степени доктора физ. -мат. наук в 2008 году. Публикуется с разрешения автора.

«ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В КОМБИНИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ»

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

ГЛАВА 1. ОПИСАНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА

ГЛАВА 2. ПРОБОЙ ГАЗА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

- 2.1. Анализ экспериментальных кривых зажигания ВЧ разряда
- 2.2. Гидродинамическая модель ВЧ пробоя газа
- 2.3. Влияние геометрии разрядной камеры
на зажигание ВЧ емкостного разряда низкого давления
- 2.4. Критерий пробоя газа в комбинированном электрическом поле
- 2.5. Критерий пробоя газа в сверхвысокочастотном электрическом поле
 - 2.5.1. СВЧ пробой при отсутствии прилипания
 - 2.5.2. СВЧ пробой в электроотрицательном газе
 - 2.5.3. Влияние слабого постоянного электрического поля
на СВЧ пробой газа
- 2.6. Закон подобия для ВЧ пробоя газа
 - 2.6.1. Анализ уравнения ВЧ пробоя
 - 2.6.2. Результаты экспериментов и обсуждение
- 2.7. Основные выводы к Главе 2

ГЛАВА 3. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ КРИВЫХ ЗАЖИГАНИЯ ВЧ РАЗРЯДА

- 3.1. Анализ движения электронов в ВЧ электрическом поле
и уравнения ВЧ пробоя газа
- 3.2. Значения дрейфовой скорости электронов в различных газах
- 3.3. Метод оценки величины ВЧ напряжения на потенциальном электроде
в технологических газоразрядных установках
 - 3.3.1. Эквивалентная схема разрядной камеры
 - 3.3.2. Экспериментальные результаты
- 3.4. Основные выводы к Главе 3

ГЛАВА 4. СЛАБОТОЧНЫЙ И СИЛЬНОТОЧНЫЙ РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ ВЧ ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА

- 4.1. ВЧ разряд в аргоне
 - 4.1.1. Вольт-амперные характеристики разряда и область
существования α -режима
 - 4.1.2. Осевая структура ВЧ разряда
 - 4.1.3. Условия существования двойных плазменных слоев
в ВЧ разряде
- 4.2. ВЧ разряд в кислороде
 - 4.2.1. Вольт-амперные характеристики разряда и область
существования α -режима

- 4.2.2. Возникновение двойного слоя в приэлектродном слое высокочастотного емкостного разряда в кислороде
- 4.3. Влияние геометрии камеры на режимы горения ВЧ разряда
- 4.4. Влияние частоты на режимы горения и альфа-гамма переход в высокочастотном емкостном разряде в N_2O
- 4.5. Механизмы α - γ перехода
- 4.6. Аналитическая модель электрических полей в столкновительном ВЧ разряде
 - 4.6.1. Случай однородного распределения параметров плазмы
 - 4.6.2. Случай неоднородного распределения параметров плазмы
- 4.7. Температура нейтрального газа в ВЧ разряде низкого давления
- 4.8. ВЧ разряд в водороде
- 4.9. Выводы к Главе 4

ГЛАВА 5. ДИССОЦИАТИВНЫЙ РЕЖИМ ГОРЕНИЯ ВЧ ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

- 5.1. ВЧ разряд в SF_6
 - 5.1.1. Экспериментальные результаты
 - 5.1.2. Обсуждение результатов для SF_6
- 5.2. ВЧ разряд в NF_3
 - 5.2.1. Экспериментальные результаты
 - 5.2.2. Обсуждение результатов для NF_3
- 5.3. ВЧ разряд в SiH_4
- 5.4. Выводы к Главе 5

ГЛАВА 6. ПОГАСАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

- 6.1. Кривые погасания ВЧ разряда
- 6.2. Влияние геометрии камеры на погасание ВЧ разряда
- 6.3. Выводы к Главе 6

ГЛАВА 7. ДВУХЧАСТОТНЫЙ РАЗРЯД

- 7.1. Зажигание двухчастотного разряда
- 7.2. Моды двухчастотного (27/2 МГц) разряда низкого давления
- 7.3. Выводы к Главе 7

ГЛАВА 8. ПРИМЕРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ ВЧ ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА

- 8.1. Плазменная очистка и травление
- 8.2. Результаты экспериментов по плазменной очистке технологических камер и травлению многослойных материалов ($Si_3N_4/SiO_2/Si$ и SiO_2/Si) в высокочастотном емкостном разряде

ВЫВОДЫ

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В диссертационной работе впервые получен закон подобия для ВЧ пробоя газа $U_{pf} = \psi(p \cdot L, L/R, f \cdot L)$ в цилиндрических разрядных трубках произвольных размеров (длины L и радиуса R) и различных частотах f ВЧ электрического поля.

Разработана двумерная гидродинамическая модель ВЧ пробоя газа в разрядных камерах сложной геометрии, учитывающая наличие вторичной электронной эмиссии с поверхности электродов.

Впервые получены критерии пробоя газа в СВЧ и комбинированных (ВЧ + постоянное, СВЧ + постоянное) электрических полях, учитывающие анизотропию диффузии электронов вдоль и поперек поля.

Впервые предложен метод определения дрейфовой скорости электронов из особых точек ВЧ кривых зажигания, а также с помощью этого метода измерены значения дрейфовой скорости электронов в сильном электрическом поле в десяти газах (в ряде из них — впервые).

Впервые экспериментально показано, что область существования слаботоочного α -режима ограничена не только со стороны средних давлений, но и со стороны низких давлений (слева от минимума кривой погасания ВЧ разряда).

Впервые экспериментально и теоретически получено, что при высоких давлениях газа α - γ переход сопровождается пробоем приэлектродных слоев, в то время как при низких давлениях газа при α - γ переходе слои не пробиты, но являются источником электронов высокой энергии.

Впервые экспериментально показано наличие диссоциативного режима горения ВЧ разряда в ряде технологических молекулярных газов.

Впервые экспериментально получено наличие области неоднозначной зависимости ВЧ напряжения погасания ВЧ разряда от давления газа.

Впервые экспериментально показано, что двухчастотный разряд может гореть в трех различных режимах: несамостоятельный ВЧ разряд, возмущенный НЧ электрическим полем; комбинированный разряд; несамостоятельный НЧ разряд, возмущенный ВЧ электрическим полем.

Содержание Проекта докторской диссертации А. В. Зыкова. Один из вариантов. Планируется к защите в первой половине 2016 года. Публикуется с разрешения автора.

**«ГЕНЕРАЦИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКА ИОННЫХ ПОТОКОВ
В ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМАХ С КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ
И МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ»**

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

**РАЗДЕЛ 1. ПРОБОЙ И ЗАЖИГАНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

- 1.1. Краткий обзор литературы по возбуждению газового разряда в комбинированных ЕН полях. Постановка задачи.
- 1.2. Экспериментальная установка, источник ионов «Радикал», методики измерений.
- 1.3. Результаты исследований пробоя, зажигания и погасания планарного магнетронного разряда.
- 1.4. Феноменологическая модель и дрейфовая теория возникновения планарного магнетронного разряда.
- 1.5. Сравнение результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных. Выводы.

**РАЗДЕЛ 2. СТАЦИОНАРНЫЕ СОСТОЯНИЯ ПЛАНАРНОГО
МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА В УСКОРИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ**

- 2.1. Краткий обзор литературы. Классификация режимов газового разряда в скрещенных ЕН полях. Постановка задачи.
- 2.2. Диагностический комплекс для изучения потока заряженных частиц в источнике ионов «Радикал».
- 2.3. Результаты измерений интегральных характеристик источника ионов «Радикал» и структуры прианодного электронного слоя.
- 2.4. Феноменологическая модель прианодного электронного слоя, дрейфовая теория стационарных состояний ПМР в ускорительном режиме.
- 2.5. Сравнение результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных. Выводы.

**РАЗДЕЛ 3. СТАЦИОНАРНЫЕ СОСТОЯНИЯ ПЛАНАРНОГО
МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА В ПЛАЗМЕННОМ РЕЖИМЕ**

- 3.1. Краткий обзор литературы по исследованиям магнетронных распылительных систем. Постановка задачи.
- 3.2. Экспериментальная установка, конструкция газоразрядного магнетрона низкого давления и методики измерений.
- 3.3. Результаты измерений кривых зажигания/погасания и интегральных характеристик магнетронного разряда.
- 3.4. Феноменологическая модель и дрейфовая теория стационарных состояний магнетронного разряда в плазменном режиме.

- 3.5. Сравнение результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных. Выводы.

РАЗДЕЛ 4. ВЧ ИНДУКЦИОННЫЙ РАЗРЯД

- 4.1. Особенности ВЧИ разряда низкого давления.
Обзор литературы. Постановка задачи.
- 4.2. Экспериментальное оборудование для изучения ВЧИ разряда и методики измерений.
- 4.3. Результаты измерений кривых зажигания/погасания и обобщенных интегральных характеристик ВЧИ разряда.
- 4.4. Пространственно усредненная модель ВЧИ разряда и дрейфовая теория стационарных состояний.
- 4.5. Сравнение результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных. Выводы.

РАЗДЕЛ 5. КОМБИНИРОВАННЫЕ РАЗРЯДЫ

- 5.1. ВЧ индукционно-емкостной разряд.
Обзор литературы. Постановка задачи.
- 5.2. Интегральные характеристики ВЧИЕ разряда.
- 5.3. Влияние потенциальных постоянного и высокочастотного электрических полей на стационарные характеристики ВЧИ разряда.
Формирование ионных и комбинированных ион-электронных потоков.
- 5.4. Модель энергобаланса в ВЧИЕ разряде.
Сравнение результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных. Выводы.
- 5.5. Индукционно-магнетронный разряд.
Обзор литературы. Постановка задачи.
- 5.6. Экспериментальная установка и результаты измерений.
- 5.7. Модель энергобаланса в ВЧИМ разряде.
Сравнение результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных. Выводы.

РАЗДЕЛ 6. ТРАНСПОРТИРОВКА,

ЗАРЯДОВАЯ И ТОКОВАЯ КОМПЕНСАЦИЯ

НИЗКО-ЭНЕРГЕТИЧНЫХ ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ ИОННЫХ ПОТОКОВ

- 6.1. Краткий обзор литературы по исследованиям автокомпенсации низкоэнергетических ионных потоков. Постановка задачи.
- 6.2. Экспериментальная установка и методики измерений.
- 6.3. Результаты измерений параметров ионно-пучковой плазмы в режимах автокомпенсации и работы с катодом компенсатором.
- 6.4. Феноменологическая модель ИПП,
дрейфовая теория стационарных состояний ИПП в режиме зарядовой автокомпенсации.
- 6.5. Сравнение результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных. Выводы.

ГЛАВА 7. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГАЗО-РАЗРЯДНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ПЛАНАРНОГО МАГНЕТРОННОГО И ВЧ ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДОВ ВЫВОДЫ

**ПРИЛОЖЕНИЕ. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ
ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

1. Автономные источники ионов низких и средних энергий.
2. Источник плазмы и ХАЧ на базе ВЧИ разряда.
3. Магнетронная распылительная система низкого давления.
4. Многофункциональная кластерная установка для РИПС сложнокомпозиционных соединений.

Содержание Проекта докторской диссертации В. И. Фареника. Приводится для информации о прикладных разработках ОНИЛ ДПТП, СКТБ «Контур», выполненных с середины 80-х до 2000 г.

«МАЛОЭНЕРГОЕМКИЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С РАЗЯДАМИ В КОМБИНИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ»

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

РАЗДЕЛ 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

- 1.1. Обзор литературы и постановка задач
- 1.2. Ускорение ионов в ВЧ приэлектродных слоях и аналог закона Чайльда-Ленгмюра
- 1.3. Ионная бомбардировка электродов и режимы ВЧЕ разряда
- 1.4. Исследования самостоятельного ВЧИ разряда низкого давления
- 1.5. Кривые зажигания и аналоги статических реактивных ВАХ для ВЧИ разряда низкого давления

РАЗДЕЛ 2. ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, БАЗОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

- 2.1. Особенности зондовых измерений в технологической плазме
- 2.2. Электрический зонд в ионно-пучковой плазме
- 2.3. Электрический зонд в плазме ВЧ разряда

РАЗДЕЛ 3. ПОЛУЧЕНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВКА ИОННЫХ ПУЧКОВ МАЛЫХ И СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ

- 3.1. Источники с ионообразующими ступенями в $E \perp H$ полях
 - 3.1.1. Источник с ионообразующей ступенью в виде обращенного магнетрона [38]
 - 3.1.2. Источник с ионообразующей ступенью в виде магнетрона с дополнительным анодом
 - 3.1.3. Модифицированный источник ионов [39]
- 3.2. Транспортировка ионных пучков
 - 3.2.1. Общие закономерности процесса нейтрализации
 - 3.2.2. Техника и условия проведения экспериментов
 - 3.2.3. Нейтрализация ИП в замкнутом пространстве транспортировки с эквипотенциальными границами
 - 3.2.4. Нейтрализация ионного пучка при наличии интенсивных источников и стоков электронов.
 - 3.2.4.1. Открытая система с ИИ холловского типа «Радикал-М»
 - 3.2.4.2. Открытая система на базе двухступенчатого источника ионов с двухсеточной ИОС
 - 3.2.5. Механизм нейтрализации ИП (качественное рассмотрение)
 - 3.2.6. Нейтрализация ИП низкой энергии в технологических процессах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

РАЗДЕЛ 4. МАЛОЭНЕРГОЕМКИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ РАЗЯДОМ Е-ТИПА

- 4.1. Особенности пробоя самостоятельного ВЧЕ разряда и его статически активных ВАХ
 - 4.1.5. Зондовые измерения внутренних параметров ВЧЕ разряда.

- 4.1.6. Исследование спектров излучения ВЧЕ разряда в установке «Контур-01»
- 4.2. Экспериментальные технологические установки ПХТ на базе оптимизированного реактора ВЧ-диодного типа.
- 4.3. Малогабаритные экспериментальные технологические установки ПХТ «Титан» с оптимизированным реактором ВЧ диодного типа
- 4.4. Скоростное плазмохимическое травление кремния в малоэнергоемких плазменных технологических установках серии «Контур» и «Титан»

РАЗДЕЛ 5. ИНДУКЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

- 5.1.2. Аналоги статических реактивных ВАХ для ВЧИ плазменного конденсатора
- 5.1.3. Энергетическая цена иона в ВЧИ разряде
- 5.1.4. ВЧ-индукционный плазменный конденсатор — управляемая газоразрядная система для устройств вакуумно-плазменного травления
- 5.2. ВЧ индукционные источники низкоэнергетичных ионов для РИЛТ.
 - 5.2.1. ИОС на основе ВЧ приэлектродного слоя
 - 5.2.2. Характеристики ИИ на базе ИПК и их технологическая апробация
 - 5.2.3. Глубинное травление GaAs
 - 5.2.4. РИЛТ гетероэпитаксиальных структур со слоями
 - 5.2.5. Бездефектное травление
- 5.3. Системы ПХТ и РИПТ на базе ИПК
 - 5.3.1. Экспериментальная технологическая установка ПХТ «Контур-02» с реактором на базе ИПК
 - 5.3.2. Экспериментальная технологическая установка ПХТ «Контур-04» с комбинированным индукционно-емкостным реактором
 - 5.3.3. Экспериментальная технологическая установка для РИПТ «Контур 05» на базе ИПК
 - 5.3.3.1. Конструкция экспериментального образца комбинированного реактора
 - 5.3.3.2. Система ВЧ питания и управления электрическими параметрами реактора
 - 5.3.3.3. Применение индукционного реактора ПХТ для плазменного проявления многослойного резистора

РАЗДЕЛ 6. МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ

- 6.2. Методы зондового контроля ИПТ
 - 6.2.1. Контроль ионно-лучевого травления
 - 6.2.3. Контроль плазмохимического травления в плазме ВЧ разрядов
- 6.3. Устройства для зондового контроля ПТП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Содержание диссертации В. М. Редванского, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в 1991 г. Публикуется с разрешения автора.

«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАЗДЕЛЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЕ»

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

О РАЗДЕЛЕНИИ ИЗОТОПОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЕННЫХ МЕТОДОВ

ТЕХНИКА И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА.

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТОДИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

- 2.1. Конструктивные особенности экспериментальных установок и условия существования разряда
- 2.2. Ввод рабочего вещества в ячейку Пеннинга
- 2.3. Методы диагностики
- 2.4. Результаты методических измерений

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЕ

ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ИОНИЗАЦИИ И УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ

- 3.1. Общие соображения
- 3.2. Экспериментальное исследование возможности возбуждения ионной циклотронной неустойчивости в диапазоне давлений рабочего газа, $P = 10^{-4} + 10^{-3}$ мм рт. ст.
- 3.3. Интенсификация процессов разделения во вращающейся плазме методом увеличения скорости извлечения продуктов разделения
- 3.4. Краткие выводы

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ВВОДА РАБОЧЕГО ВЕЩЕСТВА В РАЗРЯД НА ИОННУЮ ЦИКЛОТРОННУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ И ПРОЦЕССЫ РАЗДЕЛЕНИЯ

- 4.1. Общие соображения
- 4.2. Экспериментальное изучение влияния инжекции нейтральных частиц на процессы разделения во вращающейся плазме
- 4.3. Экспериментальное изучение влияния инжекции заряженных частиц на процессы разделения во вращающейся плазме
- 4.4. Краткие выводы

ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗОНАНСНОЙ ИОННОЙ ЦИКЛОТРОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ИЗ СЛОЖНЫХ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ И МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ

- 5.1. Общее заключение
- 5.2. Получение литиевых покрытий из литийсодержащих соединений

5.3. Экспериментальное изучение возможности
получения элементов из сложных химических соединений

5.4. Краткие выводы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЛИТЕРАТУРА

1. Впервые проведено изучение механизмов управления резонансной ионной циклотронной неустойчивостью и процессами аномального переноса частиц во вращающейся плазме, путем ввода в разрядный промежуток ионов с заданной функцией распределения по скоростям.
2. Впервые проведено изучение механизмов управления резонансной ионной циклотронной неустойчивостью и процессами аномального переноса частиц во вращающейся плазме, путем оптимизации ввода рабочего вещества в разрядный промежуток.
3. Впервые выделен кислород из многокомпонентного сложного соединения методом РЦН.
4. Показана возможность получения чистых металлов из их сложных соединений методом РЦН, минуя физико-химические пути их восстановления.
5. Определены пути повышения производительности метода РЦН путем увеличения коэффициента ионизации рабочего вещества, увеличением скорости извлечения продуктов деления, оптимальным вводом рабочего вещества и созданием плазмы с заданной функцией распределения по скоростям.

Список диссертаций, защищенных сотрудниками кафедры физики плазмы до 2012 г. и не включенных в списки 1, 2

Группа Е. И. Луценко

1. Середа Н. Д. рук. Луценко Е. И. тематика Луценко Е. И.
2. Целуйко А. Ф. рук. Луценко Е. И. тематика Луценко Е. И.
3. Димитрова В. рук. Луценко Е. И. тематика Луценко Е. И.
4. Середа К. Н. рук. Бизюков А. А. тематика Луценко Е. И.

Группа В. И. Муратова

1. Галушко Н. рук. Моисеев С. С. тематика Моисеева С. С.
2. Кононенко С. И. рук. Моисеев С. С. тематика Моисеева С. С.
3. Филиппенко В. Е. рук. Моисеев С. С. тематика Моисеева С. С.

Группа Степанова К. Н. теоретики

1. Елисеев Ю. рук. Степанов К. Н. Степанов К. Н. ЕН-поля
2. Михайленко В. М. рук. Степанов К. Н. Степанов К. Н.
3. Гордиенко И. рук. Степанов К. Н. Степанов К. Н. ЕН-поля

Докторские: тематика Степанова К. Н.

1. Егоренков В. Д. н. консультант Степанов К. Н.
2. Михайленко В. М. н. консультант Степанов К. Н.

Для полноты картины:

1. Манзюк Н. А. рук. Рожков А. М. тематика Супруненко В. А.
2. Пятов В. Н. рук. Рожков А. М. тематика УФТИ
3. Алимов С. рук. Бобков В. В. тематика Бобкова В. В.
4. Гирка А. И. рук. Бизюков А. А. пучки, тематика Бизюкова А. А.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ РУКОПИСІВ

У поданій роботі чітко і послідовно викладаються оригінальні, отримані автором (авторами) результати, що раніше не публікувалися. Рукопис не має перебувати на розгляді до публікації в іншому видавництві.

1. Роздрукований рукопис, з підписами всіх авторів, надається в 1 прим. однію із мов: українською, російською або англійською. Електронний варіант рукопису подається на магнітному або оптичному носії, або (що зручніше) надсилається по E-mail.
2. До рукопису додаються такі документи: направлення від установи, де виконана робота; заява на ім'я головного редактора з відомостями про авторів; експертний висновок про можливість опублікування роботи у відкритій пресі (для громадян України); зовнішня рецензія, підписана доктором наук.
3. Послідовність розміщення матеріалу до рукопису: індекс за універсальною десятковою класифікацією (УДК), назва статті, ініціали та прізвище автора(ів), повна поштова адреса установи, у яких виконана робота, анотація, ключові слова, текст, перелік посилань, набір ілюстрацій, підписи до рисунків та таблиць.
4. Назва статті, ініціали та прізвище автора (авторів), анотація та ключові слова подаються українською (для громадян України), російською (для громадян СНД) та англійською (для всіх авторів) мовами. Обсяг анотації не перевищує 100 слів.
5. Текст рукопису бажано структурувати розділами: Вступ, де коротко формується передісторія проблеми та мета даного дослідження. Основна частина публікації, містить постановку задачі, експериментальний і/або теоретичний опис досліджень. Висновок, у якому викладено результати досліджень, висновки, перспективи розвитку досліджень і можливі застосування.
6. Повний обсяг оглядової статті не повинен перевищувати 60-ти сторінок, оригінальної статті — 20 сторінок, короткого повідомлення — 5-ти сторінок.
7. Всі фізичні величини подаються в одиницях системи СІ.
8. Вимоги до оформлення рукопису. Параметри сторінки: формат сторінки — А4 (210 × 297 мм). Поля: праворуч — 10 мм, інші — 20 мм. Шрифт Times New Roman, міжрядковий інтервал — полуторний. Назва статті, — прописними, кегль 14 pt. Автори, текст рукопису, формули, — 12 pt, анотація, перелік посилань, — 11 pt, підписи до рисунків і таблиць — 10.
9. Електронна версія рукопису подається у форматі Microsoft Word (версії не вище MS Word 2003). Для запису формул слід використовувати вбудований редактор Microsoft

Equation 3.0 з параметрами: основний математичний символ — 12 pt, індекс, над- і підіндекси — 6 pt. Формат змінних у тексті та формулах мають бути ідентичними (бажано курсивом, грецькі символи — прямі).

10. Електронний варіант ілюстрацій подається в окремих файлах в одному із наступних форматів: tif, cdr (CorelDraw 11) чорно-білі або з градацією сірого, пронумеровані та поійменовані прізвищем першого автора.
11. Ілюстрації до рукопису (рисунки, фото, таблиці), що якоїсь причини не можуть бути надані в електронному вигляді, мають бути акуратно виконані на білому папері або подані у вигляді якісних фотографій. Їхні розміри не повинні перевищувати формат А4. На зворотному боці кожної ілюстрації вказується її порядковий номер, підпис до рисунку і прізвище першого автора.
12. Перелік посилань подається мовою оригіналу, складається в порядку посилання в тексті й відповідно до вимог ВАК України для бібліографічного опису (див. додаток).
13. Автори повідомляють про себе такі відомості: прізвище, ім'я, по-батькові, службову та домашню адреси, телефон, факс, E-mail, вказують, з ким із авторів бажано вести спілкування.

Рукописи направляються за адресою: Науковий фізико-технологічний центр МОН та НАН України, майдан Свободи, 6, м. Харків, 61022, а/с 4499, Україна.
E-mail: journal_pse@ukr.net

Додаток

1. Зыков А. В., Качанов Ю. А., Фареник В. И. Генерация потока ионов из пучкового фокуса // Письма в ЖТФ. — 1986. — Т. 12, вып. 10. — С. 593–596.
2. Zykov A. V., Dudin S. V., Farenik V. I. Low Energy Intense Ion Beams Space Charge Neutralization // Review of Scientific Instruments. — 1994. — Vol. 65, No. 4. — P. 1451–1453.
3. Егоренков В. Д., Лисовский В. А., Красников О. Б., Фареник В. И. Влияние растущих полимерных пленок на ВАХ ВЧЕ-разряда в технологических газах // Материалы IV международной конференции по физике и технологии тонких пленок. — Иванов-Франковск. — 1993. — 154 с.
4. Вербицкий В. Г. Ионные нанотехнологии в электронике. — К.: «МП Леся», 2002. — 376 с.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

В предоставляемой работе четко и последовательно излагаются оригинальные, неопубликованные ранее результаты, полученные автором (авторами). Рукопись не должна находиться на рассмотрении к публикации в другом издательстве.

1. Распечатанная рукопись, с подписями всех авторов, представляется в 1 экз. на одном из следующих языков: украинском, русском или английском. Электронный вариант рукописи предоставляется на магнитном или оптическом носителе, либо (что предпочтительнее) направляется по E-mail.
2. К рукописи прилагаются следующие документы: направление от учреждения, где выполнена работа, заявление на имя главного редактора со сведениями об авторах, экспертное заключение о возможности опубликования работы в открытой печати (для граждан Украины), внешняя рецензия, подписанная доктором наук.
3. Последовательность размещения материала статьи: индекс по универсальной десятичной классификации (УДК), название статьи, инициалы и фамилия автора(ов), полные почтовые адреса учреждений, в которых выполнена работа, аннотация, ключевые слова, текст, список цитируемой литературы, набор иллюстраций, подписи к рисункам и таблицам.
4. Название статьи, инициалы и фамилия автора(ов), аннотации и ключевые слова подаются на трех языках: украинском (для граждан Украины), русском (для граждан СНГ) и английском (для всех авторов) языках. Объем аннотации не превышает 100 слов.
5. Текст рукописи желательно структурировать разделами: Введение, кратко формулирующее предисторию проблемы и цель данного исследования. Основная часть публикации, содержащая постановку задачи, экспериментальное и/или теоретическое описание исследований. Заключение, в котором приводятся результаты исследований, выводы, перспективы развития исследований и их возможные применения.
6. Полный объем обзорной статьи не должен превышать 60 страниц, оригинальной статьи — 20 страниц, краткого сообщения — 5 страниц.
7. Все физические величины следует представлять в единицах системы СИ.
8. Требования к оформлению рукописи. Параметры страницы рукописи: формат страницы: А4 (210 × 297 мм). Поля: справа — 10 мм, остальные — 20 мм. Шрифт Times New Roman, междустрочный интервал — полуторный. Название статьи — прописными, кегль — 14 pt. Авторы, текст рукописи, формулы — 12 pt, аннотация список литературы — 11 pt, подписи к рисункам и таблицам — 10 pt.
9. Электронная версия рукописи представляется в формате Microsoft Word (версия не выше MS Word 2003). Для записи формул следует использовать встроенный редактор Microsoft Equation 3.0 с параметрами: основной математический символ — 12 pt, индекс, над- и подиндексы — 6 pt. Формат переменных в тексте и формулах должен быть идентичным (желательно курсивом, греческие символы — прямые).
10. Электронный вариант иллюстраций предоставляется в отдельных файлах в одном из следующих форматов: tif, cdr (CorelDraw 11) черно-белые с градацией серого, поименованные фамилией первого автора.
11. Иллюстрации к рукописи (рисунки, фото, таблицы), по какой-либо причине не предоставляемые в электронном виде, должны быть аккуратно выполнены на белой бумаге или представлены в виде качественных фотографий. Их размеры не должны превышать формат А4. На оборотной стороне каждой иллюстрации указывается ее порядковый номер, подрисовочная надпись и фамилия первого автора.
12. Перечень ссылок подается языком оригинала, составляется в порядке упоминания в тексте и в соответствии с требованиями ВАК Украины на библиографическое описание (см. приложение).
13. Авторы сообщают о себе следующие сведения: фамилию, имя, отчество, служебный и домашний адреса, телефон, факс, E-mail, указывают с кем из авторов предпочтительно вести переписку.
Рукописи направляются по адресу:
Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины, пл. Свободы, 6, г. Харьков, 61022, п/я 4499, Украина.
E-mail: journal_pse@ukr.net

Приложение

1. Зыков А. В., Качанов Ю. А., Фареник В. И. Генерация потока ионов из пучкового фокуса // Письма в ЖТФ. — 1986. — Т. 12, вып. 10. — С. 593–596.
2. Zykov A. V., Dudin S. V., Farenik V. I. Low Energy Intense Ion Beams Space Charge Neutralization // Review of Scientific Instruments. — 1994. — Vol. 65, No. 4. — P. 1451–1453.
3. Егоренков В. Д., Лисовский В. А., Красников О. Б., Фареник В. И. Влияние растущих полимерных пленок на ВАХ ВЧЕ-разряда в технологических газах // Материалы IV международной конференции по физике и технологии тонких пленок. — Ивано-Франковск. — 1993. — 154 с.
4. Вербицкий В. Г. Ионные нанотехнологии в электронике. — К.: «МП Леся», 2002. — 376 с.

INFORMATION FOR AUTHORS

The paper should clearly represent original, unpublished earlier results obtained by the author (authors). The manuscript must not be considered elsewhere for publication.

Only for the citizens of Ukraine the article should have a direction from the institution, where the work was made, and sanction to its open publication.

The journal publishes reviews, original articles and brief reports. The length of the review article should not in general exceed 60000 words, original article — 15000 words and brief report — 5000 words.

The paper is signed by all the authors. The authors inform about: surname, name, patronymic, office and home addresses, tel./fax, E-mail and indicate the corresponding author.

The manuscript is represented in two hard copies in one of three languages: Ukrainian, Russian or English. It is desirable to prepare the manuscript in English and its electronic version on diskette or to send it by E-mail.

The paper copies should be prepared with sequential line spacing and wide margins, on numbered sheets. The format of page is A4 (210 × 297 mm). The font is Times New Roman. Structure of the paper. Classification codes (UDS or PACS). Article title. Authors. Affiliations. Abstract. Main text. Acknowledgements. Appendices. References. Figures. Figure captions. Tables.

Abstract. Abstract is represented in two languages: English and the paper language. Abstract is submitted in Ukrainian for the citizens of Ukraine. The length of Abstract does not exceed 100 words.

Main text. It is desirable to divide the Main text in the following sections: 1) Introduction. 2) Main part (Theoretical methods. Experimental details. Results. Discussion. 3) Conclusion.

References. References should be numbered consecutively (in square brackets) through out the text and listed by number in the reference list. Listed references should be complete in all details including article titles. Please refer to the first issue of the journal or see: <http://www.univer.kharkov.ua>, Appendix for examples.

Illustration. Illustrations are submitted in two copies. Illustrations should be prepared on white paper or can be photographs. The line drawing should be prepared in black Indian ink. The photographs should be originals with somewhat more contrast than is required in the printer version. The size of illustrations should not exceed the A4 format.

Electronic version. The electronic version of the article is represented in the format of Microsoft Word. It is desirable to use the editor

of Microsoft Equation 3.0 for printing mathematical equations and formulae. The electronic form of the illustrations is represented in graphics files: tif, cdr — 1 bit, for the microphotographs — 8 bit with a grey gradation named by the surname of the author on a diskette or via e-mail. The size of one e-mail file should not exceed 1 MB. The electronic form of illustration (in graphic files) should be kept separately from the text files. The graphic files must be prepared with resolution 300 dpi and above.

Please write to the Publisher for details.

The paper should be sent to the Publisher, Editorial office, Scientific Center of Physics and Technology, MES and NAS Ukraine, 6 Svobody sq, Kharkiv, 61022, Ukraine. E-mail: journal_pse@ukr.net

Appendix

1. Zykov A. V., Dudin S. V., Farenik V. I. Low Energy Intense Ion Beams Space Charge Neutralization // Review of Scientific Instruments. — 1994. — Vol. 65, No. 4. — P. 1451–1453.
2. Baglin V., Bojko J., Grobner O., Henrist B., Hilleret N., Scheuerlein C., Taborelli M. The secondary electron yield of technical materials and its variation with surface treatment // 7th European Particle Accelerator Conference. — Vienna (Austria). — 2000. — 217 p.
3. Raizer Y. P., Shneider M. N., Yatsenko N. A. Radio-Frequency Capacitive Discharges. — CRC Press: Boca Raton, 1995. — 300 p.

Тематичні напрямки:

- фізика поверхні — модифікації, покриття, плівки, приповерхні і перехідні шари різних видів, як результат впливу плазми, корпускулярно-фотонних потоків і випромінювання;
- взаємодія різноманітних видів випромінювання з поверхнями металів, напівпровідників, діелектриків;
- фізика і техніка низькотемпературної плазми;
- фізика і техніка лазерів;
- фізичні властивості плівок і покриттів;
- нанофізика, мікро- і нанотехнології, мікро- і наноелектроніка;
- фізичні та технічні аспекти сучасних технологій обробки поверхні, діагностики і контролю технологічних процесів.

Тематические направления:

- физика поверхности — модификации, покрытия, пленки, приповерхностные и переходные слои различных видов, как результат воздействия плазмы, корпускулярно-фотонных потоков и излучения;
- взаимодействие разнообразных видов излучения с поверхностями металлов, полупроводников, диэлектриков;
- физика и техника низкотемпературной плазмы;
- физика и техника лазеров;
- физические свойства пленок и покрытий;
- нанофизика, микро- и нанотехнологии, микро- и наноэлектроника;
- физические и технические аспекты современных технологий обработки поверхности, диагностики и контроля технологических процессов.

Topic directions:

- surface physics — modification, coating, film, near-surface and transient layers of different kinds, as outcome of influencing of plasma, corpuscular-photon flows and radiation;
- interaction of miscellaneous kinds of radiation with surfaces of metals, semiconductors, dielectrics;
- physics and engineering of low-temperature plasma;
- physics and engineering of lasers;
- physical characteristics of films and coatings;
- nanophysics, micro and nanoelectronics, micro and nanotechnologies;
- physical and engineering aspects of modern technologies of surfacing, diagnostic and control of technological processes.

Наукове видання
Журнал фізики та інженерії поверхні
Том 1, № 1, 2016

Українською, російською та англійською мовами

Комп'ютерне верстання Пхалагова Н. А., Дудіна Н. Г.
Макет обкладинки Дончик І. М.

Підписано до друку 25.03.2016 р. Формат 60 × 84/8. Папір офсетний. Друк ризографічний.
Ум. друк. арк. 10,3. Обл-вид. арк. 12,8. Тираж 100 пр.

61022, м. Харків, майдан Свободи, 6.
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Інститут високих технологій

Надруковано: ХНУ імені В. Н. Каразіна
61077, Харків, майдан Свободи, 4.
Видавництво
Тел. 705-24-32
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13. 01. 09

2016

Журнал фізики
та інженерії
поверхні

Журнал фізики
и инженерии
поверхности

Том 1, № 1

Vol. 1, No. 1

Journal of
Surface Physics
and Engineering