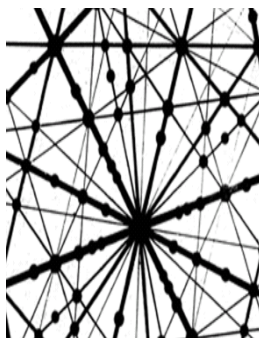


МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ  
ФИЗИКИ имени Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА



**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**  
***52-й международной Тулиновской конференции***  
**ПО ФИЗИКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**  
**ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С КРИСТАЛЛАМИ**

(Москва 30 мая – 1 июня 2023)



Москва 2023

УДК 539.1.01.08

ББК 22.37.

T29

Под общей редакцией проф. Н.Г. Чеченина

Редколлегия: А.М. Борисов, Ю.А. Ермаков,  
Е.А. Воробьева, А.А. Шемухин

T29 Тезисы докладов 52-й международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Под ред. проф. Н.Г. Чеченина  
Сборник содержит тезисы докладов, отобранные оргкомитетом для представления на конференции.

Конференция проведена при поддержке гранта Министерства науки  
и высшего образования Российской Федерации  
№ 075-15-2021-1353.

ПРОГРАММА 52-й МЕЖДУНАРОДНОЙ ТУЛИНОВСКОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ ПО ФИЗИКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С КРИСТАЛЛАМИ.

1-й день, вторник, 30 мая

9<sup>00</sup>-10<sup>00</sup> Регистрация

10<sup>00</sup>-10<sup>20</sup> Вступительное слово. Регламент конференции

Секция I

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
УСКОРЕННЫХ ЧАСТИЦ С ВЕЩЕСТВОМ (ПРИГЛАШЕННЫЕ  
ДОКЛАДЫ С ОБЗОРОМ НОВЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ В  
ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ)**

Председатель Н.Г. Чеченин

10<sup>20</sup>-10<sup>50</sup> С.Д. Федорович, В.П. Будаев, М.К. Губкин, Д.И. Кавыршин, М.С. Чилин, А. М. Никулина. Особенности модификации поверхности конструкционных материалов под воздействием стационарной гелиевой плазмы. 3

10<sup>50</sup>-11<sup>20</sup> N.A. Medvedev, A.E. Volkov. Fast heating of swift heavy ion tracks by nonthermal acceleration of atoms. 4

Секция II**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ И  
НАНОСТРУКТУРАМИ (РАСSEЯНИЕ, РАСПЫЛЕНИЕ,  
НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ И ЭМИССИЯ ВТОРИЧНЫХ  
ЧАСТИЦ)**11<sup>20</sup>-12<sup>50</sup>, 1-е заседаниеПредседатели В.С. Черныш, В.С. Ковивчак

- 11<sup>20</sup>-11<sup>35</sup> **В.П. Афанасьев, Л.Г. Лобанова, В.И. Шульга.** Коэффициенты отражения легких ионов от поверхности твердого тела. 7
- 11<sup>35</sup>-11<sup>50</sup> **В.С. Михайлов, П.Ю. Бабенко, А.Н. Зиновьев.** Моделирование распыления Be и W изотопами водорода. 8
- 11<sup>50</sup>-12<sup>05</sup> **М.А. Смирнова, В.И. Бачурин, К.Н. Лобзов, Л.А. Мазалецкий, Д.Э. Пухов, С.Г. Симакин, А.Б. Чурилов.** Угловые зависимости распыления германия ионным пучком галлия. 9
- 12<sup>05</sup>-12<sup>20</sup> **Б.Г. Атабаев, Р. Джаббарганов, А.З. Рахматов, А.И. Камардин.** Влияние термодесорбции атмосферного окисла на отрицательно-ионное атомарное и кластерное распыление монокристалла кремния ионами цезия. 10
- 12<sup>20</sup>-12<sup>35</sup> **Н.Н. Андрианова, А.М. Борисов, М.А. Овчинников, Р.Х. Хисамов, Р.Р. Мулюков.** Влияние деформационного наноструктурирования на ионно-лучевую эрозию меди. 11
- 12<sup>35</sup>-12<sup>50</sup> **В.С. Ковивчак, С.А. Матюшенко.** Влияние предварительной лазерной обработки на формирование наноструктурированного углерода на поверхности хлорполимеров при воздействии мощного ионного пучка. 12

12<sup>50</sup>-13<sup>15</sup> Общее фотографирование13<sup>15</sup>-14<sup>15</sup> Перерыв на обед

### III

#### 14<sup>15</sup> -15<sup>45</sup>, 2-е заседание

Председатель А.М. Борисов, А.А. Шемухин

- 14<sup>15</sup>-14<sup>30</sup> **А.В. Назаров, В.С. Черныш, А.Е. Иешкин, Д.С. Киреев, Д.К. Миннебаев.** Угловые распределения атомов, распылённых пучком газовых кластерных ионов. 13
- 14<sup>30</sup>-14<sup>45</sup> **Н.Г. Коробейщиков, П.В. Стишенко, И.В. Николаев О.И. Пеньков.** Моделирование распыления поверхности плавленого кварца кластерами различных газов. 14
- 14<sup>45</sup>-15<sup>00</sup> **И.В. Николаев, Н.Г. Коробейщиков.** Особенности обработки кластерными ионами аргона монокристалла  $KGd(WO_4)_2:Nd^{3+}$ . 15
- 15<sup>00</sup>-15<sup>15</sup> **Д.С. Киреев, А.Е. Иешкин, О.А. Стрелецкий, М.В. Самоделова, Н.Р. Яренков, Д. Р. Бессмертный, И. Н. Кутлусури.** Формирование SERS подложек на основе пленок серебра под действием кластерных ионов. 16
- 15<sup>15</sup>-15<sup>30</sup> **К.П. Карасев, Д.А. Стрижкин, П.А. Карасев.** Влияние потенциала взаимодействия на результат моделирования падения иона  $C_{60}$  на поверхность монокристалла кремния. 17
- 15<sup>30</sup>-15<sup>45</sup> **В.Е. Пуха, А.А. Бельмесов, Е.Н. Кабачков Г.В. Нечаев, И.Н. Лукина, Е.И. Дроздова, О.П. Черногорова.** Формирование покрытий из ускоренных ионов фторированного фуллерена  $C_{60}(CH_2F)_{12}$ . 18

#### 15<sup>45</sup> -16<sup>15</sup> Перерыв

#### 16<sup>15</sup>-18<sup>00</sup> Обсуждение стендовых докладов

#### Стендовые доклады секции «Взаимодействие ионов с поверхностью и наноструктурами (рассеяние, распыление, наноструктурирование и эмиссия вторичных частиц)»

Председатели В.П. Афанасьев, Н.Г. Чеченин

1. **Н.М. Мустафоева, Н.М. Мустафаева.** Электронные и оптические свойства нанопленок  $NiSi_2/Si$ , полученных имплантацией ионов  $Ni$  в  $Si$  в сочетании с отжигом. 19
2. **Н.М. Мустафоева, Ф.Р. Санакулов.** Влияние послеростового прогрева на морфологии тонких пленок  $NiSi_2/Si(111)$ . 20
3. **Б.Г. Атабаев, Р. Джаббарганов.** Температурные пороги отрицательно-ионного атомарного и кластерного распыления ЩГК КВг ионами цезия. 21
4. **Р. Джаббарганов, Б.Г. Атабаев, А.С. Халматов.** Энергетические пороги отрицательно-ионного атомарного и кластерного распыления ЩГК КВг ионами цезия. 22

## IV

5. **В.С. Михайлов, П.Ю. Бабенко, А.Н. Зиновьев.** Коэффициенты распыления W легкими примесями. 23
6. **П.Ю. Бабенко, В.С. Михайлов, А.Н. Зиновьев.** Влияние электронной подсистемы на экранировку потенциала при рассеянии ионов в металлах. 24
7. **В.С. Михайлов, П.Ю. Бабенко, А.Н. Зиновьев.** Зависимость углового распределения частиц при прохождении тонкой пленки от размера кристаллита. 25
8. **В.С. Михайлов, П.Ю. Бабенко, А.Н. Зиновьев.** Фокусировка пучка ионов водорода при прохождении через кристалл W. 26
9. **И.С. Дуплийчук, П.Ю. Бабенко, В.С. Михайлов, А.Н. Зиновьев.** Сечения передачи энергии и ядерные тормозные способности при бомбардировке Be изотопами водорода и гелия. 27
10. **Х.Х. Болтаев, А.А. Абдувайитов, Г.А. Розиков.** Состав, электронные и оптические свойства нанокристаллов и нанопленок силицидов металлов, исследованные методом ионной имплантации. 28
11. **Б.Е. Умирзаков, А.А. Абдувайитов, Х.Х. Болтаев, Ж. Содикжанов.** Влияние адсорбции атомов Ва на состав и эмиссионные свойства монокристаллов CdS. 29
12. **Н.Н. Андрианова, А.М. Борисов, Е.А. Воробьева, М.А. Овчинников, В.В. Слепцов, Р.А. Цырков.** Эволюция поверхности углеродного волокна при самораспылении. 30
13. **У.О. Кутлиев, К.У. Отабаева, Д.У. Худойназарова.** Компьютерное моделирование процесса распыления ионизированной плёнки, покрытой на поверхность Au(111) при бомбардировке ионами  $Ag^+$ . 31
14. **Ш.Дж. Ахунов, П.Г. Кахрамонова, Д.Т. Усманов.** Измерение ионно-фотонной эмиссии при бомбардировке Ta мишени кластерными и многоязычными ионами. 32
15. **Д.Р. Бессмертный, Д.С. Киреев, А.Е. Иешкин.** Моделирование эволюции нанорельефа при облучении газовыми кластерными ионами. 33
16. **А.Е. Иешкин, А.В. Назаров, Ю.А. Ермаков, В.С. Черныш.** Дифференциальные характеристики распыления кластерными ионами при повышенных температурах. 34
17. **И.Р. Бекпулатов, Б.Е. Умирзаков, И.Х. Турапов, Ж.М. Жумаев.** Изменение состава и электронной структуры поверхности Si при осаждении тонких слоев Mn. 35
18. **А.И. Кудюкин, Е.Н. Моос.** Сплавные электроды в вакуумно-дуговой плазме. 36
19. **А.Ш. Раджабов, Г.П. Кахрамонова, Т.Х. Эрова, Т.Ш. Тоиров, Ш.М. Ахмедов, Ш.Дж. Ухунов, С.С. Исхакова, Д.Т. Усманов.** Поверхностно-ионизационный источник ионов органических соединений с управляемой селективностью. 37
20. **И.В. Амирханов, И. Сархадов, З.К. Тухлиев.** Численные результаты тепловых процессов, возникающих в материалах, при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов. 38

21. **И.В. Амирханов, И. Сархадов, З.К. Тухлиев, Х. Гафуров.** Моделирование лазерной абляции материалов в рамках модели термического пика. 39
22. **С.У. Турапова, Ф.Д. Акбарова, М.А. Каримов, Р. Джаббарганов, А.У. Турапова, У.Б. Шаропов.** Сравнительный SRIM анализ образования дефектов при облучении Cu и Cu<sub>2</sub>O. 40
23. **Т.Э. Журабов, У.Б. Улжаев, У.Б. Халилов.** Никелевая поверхность высокого индекса для синтеза графена. 41
24. **У.Б. Улжаев, И.Д. Ядгаров, У.Б. Халилов.** Роль дефектов графена в хранении водорода. 42
25. **И.Г. Урунов, Ф.М. Сафаров, К.Б. Эгамбердиев, У.Б. Халилов.** Изменение свободной энергии в процессе агрегации нанокластеров оксида никеля. 43
26. **Н.В. Илясова, О.В. Кондракова, А.И. Кудюкин, Е.Н. Моос, М.Ю. Орлов.** Сопоставительный анализ воздействия плазменного и лазерного излучения на модельные образцы. 44
27. **Ш.Й. Аминов, А.С. Косимов, Х.И. Жабборов, И.Д. Ядгаров.** Моделирование процессов взаимодействия фуллерена C<sub>20</sub> с графеном. 45
28. **Ф.Ф. Умаров, Ш.А. Муминова, Д.В. Алябьев, И.Д. Ядгаров.** Взаимодействие атомов бора с двухслойными углеродными нанотрубками. 46
29. **А.И. Стручков, Я.Г. Горне, К.В. Карабешкин, П.А. Карасев, А.И. Титов.** Фрактальный анализ характеристик каскадов столкновений в Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 47
30. **А.Н. Ураков, А.У. Хужаниязова, Ж.Б. Хужаниязов, М.Б. Юсупжанова, Д.А. Ташмухамедова.** Изучение изменения состава ВТСП материалов в процессе имплантации ионов Ba<sup>+</sup>. 48
31. **У.Б. Улжаев, К.К. Мехмонов, И.Д. Ядгаров, М.С. Юсупов, У.Б. Халилов.** Роль кластера никеля в эффективном хранении водорода углеродными нанотрубками. 49
32. **Ф.Ф. Умаров, И.З. Уролов, Д.В. Алябьев, И.Д. Ядгаров.** Компьютерное моделирование адсорбции молекулы фуллерена C<sub>60</sub> на поверхности кремния. 50
33. **Г.Г. Бондаренко, Д.О. Савичкин, М.Р. Фишер, В.И. Кристя.** Моделирование влияния полевой электронной эмиссии из катода с тонкой диэлектрической плёнкой на его распыление в газовом разряде в смеси аргона и паров ртути. 51
34. **А.И. Кудюкин.** Разрушение электродов под тепловым воздействием ионного потока. 52
35. **Ш.Дж. Ахунов, Д.Т. Усманов, С.С. Исхакова, Ш.М. Ахмедов, А.Ш. Раджабов, П.Г. Кахрамонова, Т.Х. Эрова.** Распыление кремния при бомбардировке атомарными и молекулярными ионами. 53
36. **П.Г. Кахрамонова, Д.Т. Усманов, Ш.М. Ахмедов, А.Ш. Раджабов, Ш.Дж. Ахунов, С.С. Исхакова, Т.Х. Эрова.** Распыление молекул фталоцианина меди на GaAs подложке при бомбардировке многозарядными ионами. 54

## VI

37. **Р.Х. Хисамов, Н.Н. Андрианова, А.М. Борисов, М.А. Овчинников, И.И. Мусабилов, Р.Р. Тимирязев, Р.Р. Мулюков.** Высокодозная ионно-лучевая эрозия ультрамелкозернистого вольфрама. 55
38. **В.П. Кощев, Ю.Н. Штанов.** Компьютерное моделирование полной энергии молекулы азота. 56
39. **Б.Е. Умирзаков, И.Р. Бекпулатов, И.Х. Турапов.** Электронная структура и физические свойства наноструктур, созданных на основе двухкомпонентных полупроводников. 57
40. **М.Т. Нормуратов, К.Т. Довранов, И.Р. Бекпулатов, Д.А. Нормуродов.** Электрофизические свойства тонких пленок  $Mn_4Si_7$ , полученных методом ионно-плазменного распыления. 58
41. **А.И. Мусин, В.Н. Самойлов.** О сдвиге максимума полярного углового распределения распыленных атомов в МД-модели распыления грани (001) Ni. 59
42. **Э.Г. Никонов, Р.Г. Назмитдинов, П.И. Глуховцев.** Проявление гексатической фазы в двумерных системах с циркулярной симметрией. 60
43. **Emad M. Elsehly, N.G. Chechenin.** Thermoelectric performance of  $Fe_2VAI/ CNT$ -based alloys. 61
44. **И.Д. Парфимович, Ф.Ф. Комаров, Л.А. Власукова, И.Н. Пархоменко, Л.С. Новиков, В.Н. Черник.** Воздействие кислородной плазмы на отражательные свойства полимерных композитов с углеродными нанотрубками в диапазоне (0,25 – 25) мкм. 62
45. **В.Н. Черник, Л.С. Новиков.** Воздействие потоков кислородной плазмы на полимерные пленки с защитными покрытиями. 63
46. **В.Е. Пуха, П.А. Карасёв, А.А. Бельмесов, Е.Н. Кабачков.** Закономерности взаимодействия ионов  $C_{60}$  с поверхностью Si в диапазоне энергий 10-15 кэВ. 64
47. **Д.В. Алябьев, И.Д. Ядгаров.** Статистический анализ работы термостата при моделировании теплового движения свободных фуллеренов. 65
48. **Е.А. Скрылева, Б.Р. Сенатулин, Д.А. Киселев, Т.С. Ильина, А.Е. Иешкин.** Взаимодействие кластерных ионов аргона с поверхностью кристаллов ниобата лития. 66



2-й день, среда 31 мая

**Секция III**

**ОРИЕНТАЦИОННЫЕ И РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭФФЕКТЫ,  
ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, ИЗМЕНЕНИЕ ЗАРЯДОВОГО  
СОСТОЯНИЯ ЧАСТИЦ**

10<sup>00</sup>-11<sup>15</sup>, 1-е заседание

Председатели А.С. Кубанкин, А.Е. Лигачев

- 10<sup>00</sup>-10<sup>15</sup> С.В. Абдрашитов, О.В. Богданов, С.Б. Дабагов, А.М. Лидер, Т.А. Тухфатуллин. Гибридная схема позитронного источника для сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ). 69
- 10<sup>15</sup>-10<sup>30</sup> О.В. Богданов, П.О. Казинский, А.В. Куликова. Орбитальный угловой момент излучения релятивистских электронов в поле лазерной волны. 70
- 10<sup>30</sup>-10<sup>45</sup> Е.А. Мазур. Генерация фононов и электронных возбуждений каналированной частицей в кристаллах. 71
- 10<sup>45</sup>-11<sup>00</sup> Н.П. Калашников, А.С. Ольчак. Адиабатические инварианты при каналировании в изогнутом кристалле. 72
- 11<sup>00</sup>-11<sup>15</sup> Н.В. Новиков, Н.Г. Чеченин, А.А. Широкова. Распределение электронов при прохождении быстрых ионов через кремний. 73

11<sup>15</sup> -11<sup>30</sup> Перерыв

11<sup>30</sup>-12<sup>40</sup>, 2-е заседание

Председатели Н.В. Новиков, Н.П. Калашников

- 11<sup>30</sup>-11<sup>45</sup> А.Н. Олейник, М.Э. Гильц, А.А. Кленин, А.С. Кубанкин, П.Г. Шаповалов. Вольтамперная характеристика потока электронов при пироэлектрическом эффекте в монокристалле танталата лития. 74
- 12<sup>05</sup>-12<sup>20</sup> М.В. Булгакова, В.С. Малышевский, Г.В. Фомин. Черенковское излучение в мишенях с нарушенной азимутальной симметрией. 75
- 12<sup>00</sup>-12<sup>25</sup> Объединенный доклад:  
Н.Н. Михеев, И.Ж. Безбах. Зависимость зарядового состояния легких ионов в веществе от скорости пучка первичных частиц. 76  
Н.Н. Михеев. Простая физическая модель эффекта Баркаса-Андерсена. 77

## VIII

12<sup>25</sup>-12<sup>40</sup> **А.В. Бердниченко, А.В. Будко, И.Е. Внуков, В.В. Колодочкин, Y. Takabayashi.** Влияние параметров и ориентации кристалла на угловое распределение дифрагированного переходного излучения релятивистских электронов. 78

### 12<sup>40</sup>-13<sup>00</sup> Обсуждение стендовых докладов

#### Стендовые доклады секции «Ориентационные и релятивистские эффекты, потери энергии, изменение зарядового состояния частиц».

Председатели П.А. Карасёв, Е.А. Воробьева

1. **В.В. Сыщенко, А.И. Тарновский, А.С. Парахин, А.Ю. Исупов.** Моделирование квантовых состояний положительно заряженных частиц при каналировании в направлении [111] в кристалле кремния. 79
2. **В.В. Сыщенко, А.И. Тарновский, В.А. Кривцов.** Переходное излучение на проводящей мишени в виде прямого двугранного угла. 80
3. **В.В. Сыщенко, А.И. Тарновский, В.И. Дроник.** Об аномальной диффузии быстрых электронов в кристалле кремния. 81
4. **В.В. Сыщенко, А.И. Тарновский.** Поляризация дифракционного излучения сгустка заряженных частиц на металлической сфере. 82
5. **Н.А. Ашурко, О.В. Богданов.** Возбуждение гигантского дипольного резонанса излучением каналированных электронов в кристалле. 83
6. **М.Э. Гильц, А.Н. Олейник.** Поведение частиц порошка ниобата лития в электрическом поле. 84
7. **П.Г. Шаповалов, М.Э. Гильц, А.А. Кленин, А.С. Кубанкин, А.Н. Олейник.** Моделирование динамики электронов в пирозлектрическом ускорителе. 85
8. **О.В. Богданов, П.О. Казинский, Т.А. Тухфатуллин.** Орбитальный угловой момент излучения релятивистских электронов, при осевом каналировании в тонком кристалле Si 86
9. **А.И. Толмачев, Л. Форлано.** Влияние многократных столкновений на пробеги ионов в мишенях конечной толщины. 87
10. **П.А. Бабаев, А.Е. Волков.** Визуализация кинетики повреждения в треках быстрых тяжелых ионов в полиэтилене. 88
11. **И.А. Кишин, Е.Ю. Киданова, А.С. Кубанкин, Р.М. Нажмудинов, В.И. Алексеев, А.Н. Елисеев.** Излучение релятивистских электронов в слоистых структурах в области мягкого рентгена. 89
12. **С.В. Блажевич, А.В. Носков, А.Э. Федосеев, А.И. Чуева.** Влияние многократного рассеяния на ПИ и ДПИ релятивистского электрона в периодической слоистой среде. 90
13. **С.В. Блажевич, А.В. Носков, А.И. Чуева.** Когерентное рентгеновское излучение релятивистского электрона в периодической слоистой среде с тремя слоями на периоде. 91

## IX

14. **В.А. Бондаренко, И.Н. Бардакова, С.В. Блажевич, А.В. Носков, А.А. Юрьева.** О влиянии многократного рассеяния на переходное рентгеновское излучение в монокристаллической пластине. 92
15. **С. В. Блажевич, М.В. Бронникова, И.Н. Бардакова, А.В. Носков.** Использование дифрагированного переходного излучения для индикации расходимости пучка релятивистских электронов в периодической слоистой среде. 93
16. **А.А. Савченко, А.Д. Худякова, В. Вагнер.** Моделирование в GEANT4 излучения при осевом каналировании релятивистских заряженных частиц в монокристаллах. 94
17. **Д.И. Зайнутдинов, А.Е. Волков.** Моделирование влияния температуры на образование треков быстрых тяжелых ионов в карбиде кремния. 95
18. **Р.А. Воронков, Н.А. Медведев, А.Е. Волков.** Атермические эффекты в диэлектриках при высоких электронных возбуждениях. 96
19. **Р.Р. Эльман, В.Н. Кудияров, Р.С. Лаптев, Ю.С. Бордулев.** Разработка и апробация источника позитронов на основе изотопа  $^{64}\text{Cu}$  для IN SITU исследования перспективных материалов-накопителей водорода в процессе термостимулированной десорбции водорода. 97
20. **Т.Л. Бобровский, А.Ф. Гурбич, П.С. Прусаченко.** Определение тормозных способностей для легких ионов при помощи резонансного рассеяния. 98
21. **А.В. Бердниченко, Е.В. Быков, И.Е. Внуков, В.В. Колодочкин, А.С. Складорова, Y. Takabayashi.** Использование параметрического рентгеновского излучения электронов в кристаллах для определения параметров рентгенографических пластин. 99

13<sup>00</sup>-14<sup>00</sup> Перерыв на обед

**Секция IV****МОДИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ  
ИОННЫМИ И ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ****14<sup>00</sup>-15<sup>15</sup>, 1-е заседание****Председатели В.С. Ковивчак, В.П. Попов**

- 14<sup>00</sup>-14<sup>15</sup> А.Л. Степанов. Ионная имплантация: нанопористый германий. 103
- 14<sup>15</sup>-14<sup>30</sup> Р.М. Ёркулов, Б.Е. Умирзаков, Г.Х. Аллаярова. Влияние осаждения атомов Ва и имплантации ионов Ва<sup>+</sup> на электронную структуру монокристаллического Ge. 104
- 14<sup>30</sup>-14<sup>45</sup> В.К. Егоров, Е.В. Егоров, А.И. Ильин, А.А. Иванов. Особенности РОР исследований структур, содержащих вакансии и пустоты. 105
- 14<sup>45</sup>-15<sup>00</sup> А.А. Соловых, А.А. Сычева, Е.Н. Воронина О.В. Прошина, Т.В. Рахимова, А.П. Палов, А.Т. Рахимов. Моделирование функционализации поверхности LOW-К диэлектриков в тренчах высокочастотной плазмой с электронным пучком. 106
- 15<sup>00</sup>-15<sup>15</sup> З.А. Шарипов, Б. Батгэрэл, И.В. Пузынин, Т.П. Пузынина, И.Г. Христов, Р.Д. Христова, З.К. Тухлиев. Моделирование структурных изменений в вольфраме при облучении ионами гелия. 107

**15<sup>15</sup>-15<sup>30</sup> Перерыв****15<sup>30</sup>-16<sup>45</sup>, 2-е заседание****Председатели Д.И. Тетельбаум, Н.В. Новиков**

- 15<sup>30</sup>-15<sup>45</sup> Т.З. Гусейнов, О.Р. Бакиева, Р.Г. Валеев, А.Н. Бельтюков. Определение скорости распыления тонких плёнок С, Cr, Co. 108
- 15<sup>45</sup>-16<sup>00</sup> С.Н. Подлесный, В.А. Антонов, В.П. Попов. Спектры ОДМР NV<sup>-</sup> центров в нанослоях и наностолбах алмаза после травления сфокусированным пучком ионов Ga. 109
- 16<sup>00</sup>-16<sup>15</sup> Ю.В. Алексеенко, Н.Н. Губанова, Т.У. Phuc, Т.Ю. Зеленьяк, А.С. Дорошкевич, А. И. Кругляк. Исследование тонких плёнок SiO<sub>2</sub>:25ZrO<sub>2</sub> методом RBS. 110

## XI

- 16<sup>15</sup>-16<sup>30</sup> **Б.С. Аманжулов, И.А. Иванов, А.Е. Рыскулов, В.В. Углов, С.В. Злоцкий, М.В. Колобердин, А.Е. Курахмедов.** РОР исследования исходных и облученных пучками ионов гелия образцов ВЭС CoCrFeNi и CoCrFeNiMn. 111
- 16<sup>30</sup>-16<sup>45</sup> **И.И. Ташлыкова-Бушкевич.** Влияние ионного ассистирования на структуру и свойства поверхности нанометровых пленок сплава Al-Fe. 112

16<sup>45</sup> - 17<sup>00</sup> Перерыв

17<sup>00</sup>-18<sup>25</sup>, 3-е заседание

Председатели П.А. Карасев, В.В. Углов

- 17<sup>00</sup>-17<sup>15</sup> **В.В. Козловский, А.Э. Васильев, Е.Е. Журкин, А.А. Лебедев, М.Е. Левинштейн, А.М. Стрельчук.** Образование радиационных дефектов в оксиде галлия при торможении протонов. 113
- 17<sup>15</sup>-17<sup>30</sup> **Д.С. Королев, А.А. Никольская, К.С. Матюнина, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, Р.Н. Крюков, А.А. Сушков, Д.А. Павлов, П.А. Юнин, Д.И. Тетельбаум.** Формирование нанокристаллов Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в оксидных матрицах при имплантации ионов и последующем отжиге. 114
- 17<sup>30</sup>-17<sup>45</sup> **А.И. Клевцов, А.И. Стручков, Е.Д. Федоренко, К.В. Карабешкин, П.А. Карасев, А.И. Титов.** Сравнение характера накопления повреждений в α-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при облучении ионами P, PF<sub>4</sub> и Xe. 115
- 17<sup>45</sup>-18<sup>00</sup> **Д.И. Тетельбаум, А.А. Никольская, Д.С. Королев, А.Н. Михайлов, В.Н. Трушин, П.А. Юнин, М.Н. Дроздов, Е.В. Окулич, В.И. Окулич, А.В. Степанов.** Структура облученных слоев и распределение атомов бора при ионной имплантации бора в β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 116
- 18<sup>00</sup>-18<sup>15</sup> **А.А. Никольская, Д.С. Королев, А.Н. Михайлов, А.А. Сушков, Д.А. Павлов, П.А. Юнин, Д.И. Тетельбаум.** Люминесценция в кремнии при ионном облучении системы SiO<sub>2</sub>/Si. 117
- 18<sup>15</sup>-18<sup>30</sup> **А.Н. Дудин, В.Ю. Юрина, В.В. Нецименко, М.М. Михайлов, С.А. Юрьев, А.Н. Лапин.** Изменение оптических свойств покрытий на основе полых частиц ZnO/SiO<sub>2</sub> при облучении электронами. 118

18<sup>30</sup> - 18<sup>40</sup> Перерыв

Стендовые доклады «Модификация и анализ приповерхностных слоев ионными и электронными пучками»Председатели: А.М. Борисов, Г.Е. Ремнев

1. **В.Н. Арустамов, М.В. Кремков, И.Х. Худайкулов, И.О. Косимов.** Создание низкоомного контакта на поверхности кристалла кремния. 119
2. **В.Н. Арустамов, Б.Р. Кахрамонов, М.В. Кремков, И.Х. Худайкулов, В.П. Харьяков.** Физические характеристики низкоомного контакта, полученного магнетронным распылением. 120
3. **Б.Р. Кахрамонов, В.Н.Арустамов, В.П. Харьяков, И.Х. Худайкулов.** Исследование температурного поля приповерхностного слоя круглого прутка при движении точечного источника. 121
4. **Б.Р. Кахрамонов, В.Н.Арустамов, В.П. Харьяков, И.Х. Худайкулов.** Характеристика и морфология металлический покрытия на поверхности стекла. 122
5. **Н.В. Алов.** Ионно-лучевое восстановление поверхности высших оксидов металлов. 123
6. **Ш.М. Ахмедов, Ш.Дж. Ахунов, Д.Т. Усманов.** Исследование закономерностей поверхностной ионизации инсектицида имидаклоприда. 124
7. **У.О. Кутлиев, А.С. Аширов, М.К. Каримов.** Исследования рассеяния ионов  $Ne^+$  с поверхностью  $SiO_2(001)\langle 110 \rangle$  при малых углах скольжения. 125
8. **С.М. Барайшук, В.К. Долгий, А.А. Шевченко.** Формирование покрытия, содержащего  $MoSi_2$ , для применения в составе ИК сенсоров. 126
9. **О.А. Подсвилов, С.А. Шестаков, В.В. Журихина.** Генерация второй оптической гармоники в стеклах. 127
10. **Н.М. Мустафоева, А.К. Ташатов, Б.Е. Умирзаков.** Исследование электронно-оптических свойств нанопленок  $NiSi_2$ . 128
11. **М.А. Кругляков, Е.Н. Степанова, Г.П. Грабовецкая.** Влияние облучения импульсным электронным пучком на дефектную структуру приповерхностного слоя сплавов системы Zr-Nb-H. 129
12. **И.В. Кузив.** Применение позитронной аннигиляционной спектроскопии для анализа дефектов кристаллической решетки. 130
13. **М.В. Жидков, А.Е. Лигачев, Г.В. Потемкин, Г. Е. Ремнев.** Изменения фазового состава нержавеющей стали после воздействия мощного ионного пучка. 131

### XIII

14. **Д.Е. Мележенко, Д.В. Лопаев, А.И. Зотович, С.А. Хлебников, А.А. Соловых, Ю.А. Манкелевич, Л.С. Новиков, Е.Н. Воронина.** Экспериментальное и теоретическое исследование функционализации квазидвумерных образцов  $\text{MoS}_2$  плазмой  $\text{N}_2/\text{H}_2/\text{O}_2$ . 132
15. **М.А. Каримов, Ф.Д. Акбарова, С.У. Ту-ропова, Р. Джаббарганов, У.Б. Шаропов.** Масс-спектрометрический элементный анализ отрицательных ионов при распылении меди. 133
16. **Л.Ю. Немирович-Данченко, Л.А. Святкин, И.П. Чернов.** Особенности электронной структуры системы палладий-серебро-водород. 134
17. **А.А. Никольская, Д.С. Королев, А.Н. Михайлов, А.В. Кудрин, В.Н. Трушин, М.Н. Дроздов, А.А. Конаков, А.А. Ревин, Д.И. Тетельбаум.** Ионное легирование  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  кремнием. 135
18. **С.А. Горбунов, М.В. Горшенков, П.А. Бабаев, А.Е. Волков, Р.А. Воронков, Г.В. Калинина.** Синтез наноразмерных пор с некруговым поперечным сечением при помощи облучения оливина быстрыми тяжёлыми ионами. 136
19. **И.А. Столяр, В.Г. Шепелевич, И.И. Ташлыкова-Бушкевич, E. Wendler, R. Wu.** Анализ приповерхностных слоев быстрозатвердевшего сплава  $\text{Al-Mg-Li-Sc-Zr}$  методом мгновенных ядерных реакций после высокотемпературного отжига 137
20. **В.П. Афанасьев, Д.С. Ефременко, Л.Г. Лобанова.** Влияние процессов многократного упругого рассеяния в многокомпонентных мишенях на интенсивность пиков упруго отраженных электронов. 138
21. **Б.Е. Умирзаков, С.Т. Абраева, С.Т. Гулямова, И.Ф. Худойбердиев, Х.Х. Болтаев, Д.А. Ташмухамедова.** Изучение электронной и кристаллической структуры Ge при бомбардировки ионами  $\text{Ag}^+$ . 139
22. **Д.С. Лукьянцев, А.В. Лубенченко, Д.А. Иванов, О.Н. Павлов.** Влияние слаботоочного ионного распыления неоднородных металл-оксидных плёнок на их послойный химических состав. 140
23. **З.А. Исаханов, А.С. Халматов, Р. Джаббарганов, О. Бекмурзаева, А.А. Ахмедов.** Особенности очистки меди в зависимости от температурного нагрева. 141
24. **И.О. Косимов, З.А. Исаханов, Б.Е. Умирзаков, А.С. Халматов.** Порошковая рентгеновская дифрактометрия оксида титана. 142
25. **А.А. Абдуваитов, Ш.А. Талипова, Х.Э. Абдиев, М.Б. Юсупжанова, Д.А. Ташмухамедова, Б.Е. Умирзаков.** Влияние имплантации ионов  $\text{O}^{2+}$  на состав поверхности Ti. 143
26. **С.С. Волков, Т.И. Китаева, С.В. Николин.** Физические особенности исследования технологических объектов. 144

## XIV

27. **В.Л. Воробьёв, П.В. Быков, С.Г. Быстров, В.Я. Баянкин.** Влияние поочередного облучения ионами  $O^+$  и  $N^+$  на состав, структуру и электрохимические свойства титанового сплава ВТ6. 145
28. **Т.В. Панова, В.С. Ковивчак.** Анализ состояния поверхностного слоя композиционного сплава САП-2 после облучения мощным ионным пучком. 146
29. **Е.А. Созонтов, Э.А. Грешников, И.Н. Трунькин, И.И. Ёлкина.** Электронные, ионные пучки и энергодисперсионный рентгеновский микроанализ в комплексном исследовании золотных нитей как элементов декора средневекового текстиля. 147
30. **Б.Ф. Фаррахов, Я.В. Фаттахов.** Определение оптической дифракцией энергии активации твердофазной рекристаллизации в  $Si(111)$  имплантированной ионами  $P^+$ . 148
31. **В.М. Студзинский, К.В. Карабешкин, М.В. Мишин, Е.Д. Федоренко, П.А. Карасев.** Влияние облучения ионами на полимерную подложку в процессе формирования наночастиц золота. 149
32. **Р.И. Баталов, Г.А. Новиков, Д.А. Файзуллин, Н.В. Курбатова, К.И. Герасимов.** Импульсная ионная обработка и термический отжиг сапфира, имплантированного ионами хрома. 150
33. **Р.И. Баталов, Д.А. Файзуллин, В.Ф. Валеев, В.И. Нуждин, А.М. Рогов, А.Л. Степанов.** Со-имплантация кремния ионами индия, мышьяка и сурьмы для формирования наночастиц узкозонных АЗВ5 полупроводников, перспективных для ИК-фотоприёмников. 151
34. **А.И. Пушкарев, Ю.И. Егорова, С.С. Полисадов.** Эффект дальнего действия при модификации приповерхностных слоев ионными пучками. 152
35. **Н.В. Ткаченко, А.И. Каменских, С.А. Тюфтяков.** Исследование пористых и неоднородных материалов методом ядерного обратного рассеяния. 153
36. **Н.В. Ткаченко, А.И. Каменских, С.А. Тюфтяков.** Разработка методик анализа полимерных материалов на основе спектрометрии обратного рассеяния протонов. 154
37. **В.В. Привезенцев, А.А. Фирсов, А.П. Сергеев, В.С. Куликаускас, В.В. Затекин, Е.П. Кириленко, А.В. Горячев, А.А. Ковальский.** Исследование пленок  $SiO_2$ , имплантированных  $Zn$ , в качестве активной среды мемристоров. 155
38. **О.М. Михалкович, С.М. Барайшук.** Морфология  $Ti$  пленки полученной на облученной ионами ксенона кремнии катодным вакуумным распылением при ионном ассистировании. 156
39. **Ф.Д. Акбарова, М.А. Каримов, С.У. Туропова, Р. Джаббарганов, У.Б. Шаропов.** Спектроскопия полного тока при окислении поверхности меди. 157



40. **А.К. Ташатов, Н.М. Мустафоева, С.М. Эшбобоев.** Формирование нанопленок NiSi<sub>2</sub> при ионной имплантации. 158
41. **Т.П. Каминская, М.Н. Шипко, М.А. Степович, А.А. Вирус, А.И. Тихонов, В.В. Попов.** Изучение локальных магнитных свойств ленточных аморфных сплавов Fe(Ni,Cu)(SiB), полученных методом сверхбыстрого охлаждения. 159
42. **В.В. Поплавский, И.Л. Поболь, А.Н. Дробов.** Особенности фазового состава слоев, формируемых в процессе ионно-плазменного азотирования поверхности сплавов титана. 160
43. **Э.Ф. Хаметова, О.Р. Бакиева.** Методика обработки и анализа EXELFS спектров без учета априорной информации. 161
44. **Н.В. Новиков, Н.Г. Чеченин, А.А. Широкова.** Особенности отражения электронов слоем из углеродных нанотрубок. 162
45. **О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Ю.А. Дудин, Д.А. Здоровейшев, А.В. Нежданов, А.Е. Парафин, Е.А. Питиримова, С.М. Планкина.** Ионно-имплантационное легирование GaAs висмутом. 163
46. **М.Н. Шипко, А.В. Агафонов, М.А. Степович, З.Х. Калажоков, Х.Х. Калажоков, А.В. Хлюстова, Н.А. Сироткин, А.А. Вирус.** Рентгеновские исследования нанокомпозитов Fe-NiCr, полученных в подводной низкотемпературной плазме. 164
47. **Г.С. Дегтяренко, Е.Н. Кабачков, И.И. Ходос, В.Е. Пуха, Г.В. Нечаев.** Химические связи и структура покрытий при осаждении ионов C60 в атмосфере азота. 165
48. **Б.Л. Оксенгендлер, Б.Р. Кутлимуротов, С.Е. Максимов, Х.Б. Ашуров.** Действие ионизирующей радиации на фрактальные поверхности твёрдых тел. 166
49. **Ф.Г. Нешов, И.Н. Бажукова, Л.В. Викторов, Д.В. Райков.** Бактерицидность алмазоподобных пленок, легированных ионами тантала. 167
50. **А.Д. Шпорин, О.М. Марченко, А.П. Евсеев, Е.А. Воробьева, Ю.В. Балакшин, Д.К. Миннебаев, А.А. Шемухин.** Изменение структуры и электрофизических свойств МУНТ под действием ионного облучения. 168
51. **Е.Ю. Зыкова, А.Е. Иешкин, Н.Г. Орликовская, Э.И. Рау, А.А. Татаринцев.** Электризация кварцевых стекол электронными пучками. 169
52. **Г.Х. Аллаярова, Б.Е. Умирзаков, А.К. Ташатов.** Элементный и химический состав поверхности Si(111) легированного ионами O<sub>2</sub> 170
53. **Г.Х. Аллаярова, М.М. Файзиев.** Влияние имплантации ионов O<sup>2+</sup> на элементный и химический состав поверхности Si(111). 171
54. **А.Д. Ломыгин, Р.С. Лаптев, А.Г. Конец, S. Krzysztof.** Анализ наноразмерных металлических слоев Zr/Nb после протонного облучения. 172

55. **А.И. Кругляк, Т.Ю. Зеленьяк, Р.Л. Туап, А.С. Дорошкевич, В.К. Ксенович, В.А. Доросинец, М.А. Самарина, Д.В. Адамчук.** Применение метода резерфордского обратного рассеяния в исследованиях элементного состава пленок оксида олова, легированных ферромагнитными металлами. 173

3-й день, четверг, 1 июняСекция V**РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В НАНОСТРУКТУРАХ (НАНО- И БИО- ОБЪЕКТЫ). ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ**10<sup>00</sup> - 12<sup>00</sup>, 1-е заседаниеПредседатели **А.А. Шемухин, В.В. Козловский**

- 10<sup>00</sup>-10<sup>15</sup> **С.Р. Углов, А.В. Вуколов, М.В. Шевелев.** Спектр когерентного ВУФ излучения генерируемого электронами 5.7 МэВ в многослойной периодической структуре. 177
- 10<sup>15</sup>-10<sup>30</sup> **Н.В. Илясова, О.В. Кондракова, А.И. Кудюкин, Е.Н. Моос, М.Ю. Орлов.** Воздействие плазменного и лазерного излучения на модельные биоматериалы. 178
- 10<sup>30</sup>-10<sup>45</sup> **Е.В. Окулич, В.И. Окулич, Д.И. Тетельбаум.** Разработка и реализация алгоритма оценки дефектной структуры облученных слоев оксида кремния на начальном этапе постимплантационного отжига. 179
- 10<sup>45</sup>-11<sup>00</sup> **Е.Д. Рубцова, И.А. Каменских.** Исследование люминесцентных свойств гибридных перовскитов с использованием синхротронного излучения. 180
- 11<sup>00</sup>-11<sup>15</sup> **И.К. Аверкиев, О.Р. Бакнева, В.В. Кривенцов.** Исследование локальной атомной структуры методами EXAFS- и EXELFS-спектроскопии. 181
- 11<sup>15</sup>-11<sup>30</sup> **А.Д. Крот, А.Л. Тригуб, И.Э. Власова.** Поверхностные комплексы уранила на природных сорбентах по данным EXAFS. 182
- 11<sup>30</sup>-11<sup>45</sup> **М.М. Токтаганова, Д.А. Шкитов.** Обзор электронных ускорителей России, предназначенных для исследовательских целей. 183
- 11<sup>45</sup>-12<sup>00</sup> **В.Д. Жакетов.** Низкотемпературные исследования на рефлектометре поляризованных нейтронов РЕМУР. 184

12<sup>00</sup>-12<sup>15</sup> Перерыв

12<sup>15</sup>-13<sup>00</sup> Обсуждение стендовых докладов

**РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В НАНОСТРУКТУРАХ (НАНО- И  
БИО- ОБЪЕКТЫ).  
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ,  
СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ**

Председатели **И.И. Ташлыкова-Бущкевич, Ю.В. Балакшин**

Стендовые доклады

1. **D.M. Mirzayeva, S.P. Kaplina, M.V. Gustova, I.Z. Kamanina.** Crystal structure of the leptothrix bio bacteria. Lepto-thrix as absorption of heavy metals and natural radi-oactive elements. 185
2. **Л.А. Жилияков, В.С. Куликаускас.** Электромагнитное излучение пучков ускоренных электронов при скользящем взаимодействии с диэлектрической поверхностью. 186
3. **Д.В. Андреев.** Накопление и стирание радиационно-индуцированного заряда в МОП-структурах. 187
4. **В.В. Андреев, С.А. Корнев, А.И. Власовский.** Исследование влияния радиационно- и инъекционно- термических обработок на модификацию диэлектрических пленок МДП-структур. 188
5. **Р.А. Рымжанов, А.Е. Волков.** Моделирование отклика нанокристаллических диэлектриков на облучение быстрыми тяжелыми ионами. 189
6. **Р. Рспаев, А.Л. Козловский.** Изучение кинетики накопления радиационных повреждений в CeO<sub>2</sub> керамиках допированных Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 190
7. **Н.А. Сайлауханов, Ш.Г. Гиниятова, А.Л. Козловский.** Синтез радиационно-стойких керамик ZrO<sub>2</sub> – CeO<sub>2</sub> с применением метода механохимического синтеза. 191
8. **М.Е. Калиекперов, М.Т. Идинов, А.Л. Козловский.** Оценка эффективности экранирования рентгеновского излучения с помощью тонких CuBi<sub>2</sub>O<sub>4</sub> пленок. 192
9. **В.В. Углов, И.А. Иванов, С.В. Злоцкий, А.Е. Рыскулов, Б.С. Аманжулов, М.В. Колобердин.** Состав и структура высокоэнтропийных сплавов NiCoFeCr и NiCoFeCrM 193
10. **В.А. Андрианов, К.А. Бедельбекова.** Влияние облучения на размер зерна и тукстуру в фольгах Мо и Та. 194
11. **М.М. Михайлов, В.В. Нещименко, С.А. Юрьев, А.Н. Лапин, В.А. Горончко А.Н. Дудин, В.Ю. Юрина.** Влияние облучения электронами на оптические свойства порошка оксида цинка модифицированного наночастицами оксида магния. 195

XIX

12. **М.М. Михайлов, В.А. Горончко, Д.С. Федосов, А.Н. Лапин, С.А. Юрьев.** Оптические свойства и радиационная стойкость микро- и нанопорошков  $Gd_2O_3$ . 196
13. **В.А. Антонов, А.П. Калугин, В.П. Попов, А.В. Мяконьких, К.В. Руденко, В.А. Скуратов.** Радиационные повреждения КНС псевдо-МОП транзисторов после облучения быстрыми ионами Хе и Ви. 197
14. **С.О. Огнев, Д.В. Терентьева, Л.А. Святкин, Р.С. Лаптев.** Влияние примесных атомов Н и Не на аннигиляцию позитронов в Zr и Nb. 198
15. **Е.А. Созонтов.** Рентгеновский зонд с интегрированной оптикой для возможных применений в таргетной лучевой терапии и биомедицинских исследованиях. 199
16. **Т.В. Плахова, А.Ю. Романчук, А.С. Кузенкова, С.Н. Калмыков.** Исследование механизма формирования наночастиц  $ThO_2$  с использованием PDF анализа. 200
17. **С.Х. Сулейманов, А.Ф. Зацепин, Б.Л. Оксенгендлер, С.Е. Максимов, Н.Н. Никифорова.** Особенности радиационных процессов в хиральных объектах. 201
18. **R.N. Khelifa, N.N. Nikitenkov.** Predicting irradiation induced damage using the stopping and range of ions in matter. 202
19. **А.С. Комлев, Р.А. Макарьин, А.Р. Ващенко, М.С. Селезнев, Н.С. Перов.** Особенности индуцированного магнитным полем фазового перехода в сплаве FeRh. 203
20. **М.В. Чиркин, С.В. Устинов, В.Ю. Мишин, А.Е. Серебряков.** Импедансно-резонансная спектроскопия в гелий-неоновых лазерах. 204

13<sup>00</sup>-13<sup>15</sup> Дискуссия. Конкурс молодых ученых

13<sup>15</sup>-13<sup>45</sup> Объявление победителей. Заключительное слово



**Секция I**

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
УСКОРЕННЫХ ЧАСТИЦ С ВЕЩЕСТВОМ (ПРИГЛАШЕННЫЕ  
ДОКЛАДЫ С ОБЗОРОМ НОВЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ В  
ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ)**





ОСОБЕННОСТИ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ  
СТАЦИОНАРНОЙ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ

С.Д. Федорович<sup>1,\*</sup>, В.П. Будаев<sup>1,2)</sup>, М.К. Губкин<sup>1)</sup>,  
Д.И. Кавыршин<sup>1,3)</sup>, М.С. Чилин<sup>1)</sup>, А. М. Никулина<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> НИУ «МЭИ», Москва, Россия

<sup>2)</sup> НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия

<sup>3)</sup> ИВТ РАН, Москва, Россия

<sup>\*</sup>) e-mail: FedorovichSD@mail.ru

В результате действия стационарных плазменных нагрузок при определенных условиях можно получать модифицированные поверхности конструкционных материалов. Новые поверхности обладают рядом свойств, которые необходимо учитывать при проектировании элементов конструкций, обращенных к плазме. В данной работе проводится обзор полученных в экспериментах на плазменной установке ПЛМ [1] модифицированных поверхностей конструкционных материалов – вольфрам, молибден, графит, нержавеющая сталь, титан, медь. Для описания процесса возникновения новых структур и систематизации полученных вариантов микроструктур в зависимости от параметров эксперимента (температуры образца, энергии ионов) используется теория миграции поверхностных адатомов, предложенная в работе [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FSWF-2023-0016.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.П. Будаев, С.Д. Федорович, М.В. Лукашевский, Ю.В. Мартыненко, М.К. Губкин, А.В. Карпов, А.В. Лазукин, Е.А. Шестаков. // ВАНТ. Сер.Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 3, с. 23-25.
2. Мартыненко Ю.В., Нагель М.Ю. // Физика плазмы, 2012, т.38, №12, с.1082-1086.

## FAST HEATING OF SWIFT HEAVY ION TRACKS BY NONTHERMAL ACCELERATION OF ATOMS

N.A. Medvedev<sup>1,2)</sup>, A.E. Volkov<sup>3,\*)</sup>

<sup>1)</sup> Institute of Physics, Prague, Czech Republic

<sup>2)</sup> Institute of Plasma Physics, Prague, Czech Republic

<sup>3)</sup> NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia

<sup>\*)</sup> e-mail: a.e.volkov@list.ru

Atomic heating in tracks swift heavy ions decelerated in the electronic stopping regime has to occur within a time of electronic cooling there, i.e.  $\sim 100$  fs. This implies a necessity of an extremely fast electron-atomic lattice energy exchange (“electron-phonon coupling”) for the production of damaged ion tracks. In contrast, laser-irradiation experiments and calculations show too slow electron-phonon energy exchange to cause structural changes detected in swift heavy ion tracks in solids. We demonstrate /1/ that this contradiction can be resolved by taking into account that electron-phonon coupling is not the sole mechanism of energy exchange between electrons and ions in condensed matter. Excitation of the electronic system alters the potential energy surface of atoms, causing them to accelerate and increase their kinetic energy at ultrashort times.

### REFERENCES

1. N.Medvedev, A.E.Volkov // J. Appl. Phys., 2022, 131, 225903.

**Секция II**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ И  
НАНОСТРУКТУРАМИ (РАСSEЯНИЕ, РАСПЫЛЕНИЕ,  
НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ И ЭМИССИЯ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ)**



## КОЭФФИЦИЕНТЫ ОТРАЖЕНИЯ ЛЕГКИХ ИОНОВ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

В.П. Афанасьев<sup>1,\*</sup>, Л.Г. Лобанова<sup>1</sup>, В.И. Шульга<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>) НИУ «МЭИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>) НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*) e-mail: v.af@mail.ru

Данные о коэффициентах отражения при бомбардировке поверхности легкими ионами с энергией от сотен до нескольких тысяч эВ необходимы как для интерпретации спектров, получаемых методами ионной спектроскопии, так и для анализа процессов эрозии поверхностей и рециклинга в перспективных энергетических установках.

В работе предложена аналитическая теория отражения легких ионов от твердых тел, справедливая в широком интервале энергий (от сотен до тысяч эВ) и для любой геометрии рассеяния. Основой теории является так называемый метод Освальда-Каспера-Гауклера, успешно применяемый в задачах отражения электронов.

Получены формулы для расчета коэффициентов отражения частиц и энергии. Например, плотность потока частиц, отраженных в верхнюю полусферу, как функция угла падения,  $S_N(\mu_0)$ , определяется формулой:

$$S_N(\mu_0) = 2\pi l_{tr} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2l+1}{2} r_l(\mu_0) S_l, \quad (1)$$

где  $l_{tr}$  – транспортная длина;  $r_l(\mu_0) = \mu_0 P_l(\mu_0) \int_0^{-1} d\mu \frac{|\mu|}{\mu_0 + |\mu|} P_l(\mu)$ ;  $\mu_0$ ,  $\mu$  – косинус угла падения и отражения соответственно;  $P_l$  – полиномы Лежандра;

$S_l = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(R_0/l_{tr})^n}{n \cdot n!} (-1)^n [(1 - x^l)^n - 1]$ ;  $R_0$  – тормозной путь ионов;  $x^l$  – коэффициенты разложения индикатрисы упругого рассеяния в ряд по полиномам Лежандра. Величина  $R_0$  определялась на основе данных NIST;  $l_{tr}$  – с использованием формулы для транспортного сечения Фирсова; дифференциальное сечение упругого рассеяния определялось в первом борновском приближении для потенциала Кг-С.

Результаты аналитического решения сравниваются с результатами компьютерного моделирования и экспериментальными данными.

Исследование проведено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSWF-2023-0016.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ Be И W ИЗОТОПАМИ ВОДОРОДА

В.С. Михайлов\*, П.Ю. Бабенко, А.Н. Зиновьев  
 ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия  
 \*e-mail: chiro@bk.ru

Проведены расчеты коэффициентов распыления и зависимостей от угла падения пучка на мишень для энергий соударения 10 эВ - 100 кэВ. Рассматривались два варианта состояния поверхности: гладкая поверхность и поверхность, состоящая из острий. Распыленными считались частицы, преодолевшие энергию связи с поверхностью  $E_s$ . Для гладкой поверхности рассматривались частицы с энергией  $E > E_s \cdot \cos^2\theta$ , то есть использовался плоскостной потенциал. Для поверхности из острий применялся сферический потенциал ( $E > E_s$ ).

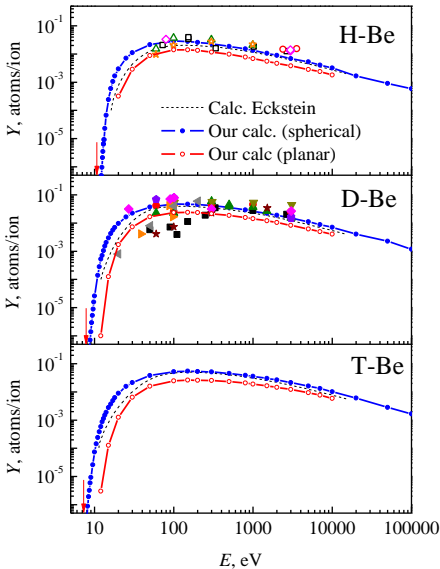


Рис.1 Зависимость коэффициента распыления Be от энергии соударения для различных изотопов. Наш расчет для сферического барьера (spherical) и для плоскостного барьера (planar). Точки – эксперимент [1]. Штриховая линия – расчет SDTrimSP [2]. Стрелочками показано положение порогов распыления.

Как видно из рис.1, значения коэффициентов распыления заметно зависят от состояния поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. R. Behrisch, W. Eckstein, Sputtering by Particle Bombardment, Berlin, Springer, 2007.
2. R.E.H. Clark, Atomic and plasma-material interaction data for fusion, v.7, Part B, Vienna, IAEA, 2001.

## УГЛОВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ РАСПЫЛЕНИЯ ГЕРМАНИЯ ИОННЫМ ПУЧКОМ ГАЛЛИЯ

М.А. Смирнова<sup>1,2)</sup>, В.И. Бачурин<sup>1,2,\*)</sup>, К.Н. Лобзов<sup>1,2)</sup>,  
Л.А. Мазалецкий<sup>2)</sup>, Д.Э. Пухов<sup>1)</sup>, С.Г. Симакин<sup>1)</sup>,  
А.Б. Чурилов<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>Ярославский филиал Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН, Ярославль, Россия

<sup>2)</sup>Ярославский государственный университет  
им. П.Г. Демидова, Ярославль, Россия

\*<sup>\*)</sup> vibachurin@mail.ru

Известно, что облучение поверхности германия ионами инертных газов и металлов приводит к образованию на поверхности пористой структуры /1/. В представленной работе проведено исследование угловых и дозовых зависимостей коэффициента распыления Ge пучком ионов Ga<sup>+</sup>, распределения имплантированных ионов Ga методом ВИМС и топографии поверхности методом сканирующей электронной микроскопии. Распыление образцов проводилось на установке Quanta 3D 200i пучком 30 кэВ Ga<sup>+</sup> диаметром 60 нм, при углах падения от 0 до 85° и дозах облучения от 10<sup>15</sup> до 5·10<sup>18</sup> см<sup>-2</sup>. Методики определения коэффициента распыления (Y) и распределения Ga в Ge на установке ВИМС IONTOF<sup>5</sup> подробно описаны в работе /2/. Процессы распыления и имплантации моделировались с помощью программы TRYDIN. Установлено, что, начиная с дозы, облучения 5·10<sup>18</sup> см<sup>-2</sup> на поверхности Ge наблюдается порообразование, форма и плотность пор зависит как от дозы облучения, так и от угла падения ионного пучка. Топография поверхности существенным образом влияет на дозовые и угловые зависимости Y. Сравнение экспериментальных и рассчитанных значений Y дает возможность оценить пористость получаемых структур.

## ЛИТЕРАТУРА

1. L. Bischoff, W. Pilz, B. Schmidt // Appl. Phys. A, 2011, Vol. 104, p. 1153.
2. V. I. Bachurin, I. V. Zhuravlev, D. E. Pukhov, et al. // J. Surf. Investigations, 2020, Vol. 14, No. 4, p. 784.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДЕСОРБЦИИ АТМОСФЕРНОГО ОКИСЛА НА  
ОТРИЦАТЕЛЬНО-ИОННОЕ АТОМАРНОЕ И КЛАСТЕРНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ  
МОНОКРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ ИОНАМИ ЦЕЗИЯ

Б.Г. Атабаев<sup>1)</sup>, Р. Джаббарганов<sup>1)</sup>, А.З. Рахматов<sup>2)</sup>,  
А.И. Камардин<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУ, Ташкент,  
Узбекистан

<sup>2)</sup> Акционерное общество Фотон, Узэлтханаоат,  
Ташкент, Узбекистан

<sup>3)</sup> Специализированное конструкторское бюро Академприбор АН РУ,  
Ташкент, Узбекистан

Методом статического СВВ ВИМС исследованы температурные зависимости атомарного и кластерного распыления монокристалла кремния ионами цезия. Показано, что выход ионов кислорода  $O$  уменьшается в 10 раз, а ионов кремния  $Si$  увеличивается более чем в 20 раз при нагреве до  $1000^0 C$ . Выход молекулярных ионов кислорода  $O_2$ , оксидных кластеров кремния  $Si_3O$ ,  $Si_2O$ ,  $SiO$  и  $SiO_2$  прекращается при нагреве до  $700^0C$ . Определены температурные пороги распыления кремния в виде димеров  $Si_2$  -  $400^0C$ , тримеров  $Si_3$ , тетрамеров  $Si_4$  и пентамеров  $Si_5$ - $500^0C$ . Одновременно с этим появляются выходы ионов, диффундирующих из объема углерода  $C$  и карбида кремния  $SiC$ . Таким образом, при термодесорбции атмосферного окисла наблюдается прекращение распыления оксидных кластеров кремния и резкое увеличение распыления кластеров  $Si_2$ - $Si_5$  кремниевой подложки при нагреве до  $700^0C$ . Эффективное кластерное распыление объясняется симметричными столкновениями атомов мишени и развитием нелинейных каскадов смещения.



## ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ НА ИОННО-ЛУЧЕВУЮ ЭРОЗИЮ МЕДИ

Н.Н. Андрианова<sup>1,2)</sup>, А.М. Борисов<sup>1,2,3)</sup>, М.А. Овчинников<sup>1)</sup>,

Р.Х. Хисамов<sup>4)</sup>, Р.Р. Мулюков<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

<sup>2)</sup> МАИ (НИУ), Москва, Россия

<sup>3)</sup> МГТУ Станкин, Москва, Россия

<sup>4)</sup> ИПСМ РАН, Уфа, Россия

ov.mikhail@gmail.com

Представлены результаты воздействия высокодозного облучения ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией 30 кэВ на морфологию и распыление поверхности меди до и после деформационного наноструктурирования. В сериях облучений по нормали к поверхности с шагом по флуенсу  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  температура не превышала  $50^\circ\text{C}$ . Растровая электронная микроскопия показала формирование конусообразной морфологии поверхности с углом раствора конусов около  $16^\circ$  для обоих видов образцов, но с кратно уменьшенной высотой конусов на поверхности меди после деформационного наноструктурирования. При этом измеренные весовым методом коэффициенты распыления после первого и последующих облучения обоих видов образцов оказались близкими друг к другу,  $Y \approx 9.5 \text{ ат./ион}$ . Таким образом, коэффициент распыления практически не зависил ни от структуры меди, ни от ионно-индуцированной морфологии поверхности. Полученные результаты рассматриваются в рамках представлений и моделей распыления шероховатых поверхностей [1-3]. Выявлена определяющая роль перепыления для изученных случаев ионно-лучевого распыления.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Жукова Ю.Н., Машкова Е.С., Молчанов В.А., Сотников В.М., Экштайн В. // Изв. АН. Сер. физ. 1994. Т. 58. С. 92.
2. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Машкова Е.С., Немов А.С. // Поверхность. 2005. №3. С. 79-84.
3. Szabo P.S., Cupak C., Biber H., Jaggi N., Galli A., Wurz P., Aumayr F. // Surfaces and Interfaces. 2022. V. 30. 101924.

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА  
ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО УГЛЕРОДА НА  
ПОВЕРХНОСТИ ХЛОРПОЛИМЕРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНОГО  
ИОННОГО ПУЧКА

В.С. Ковивчак<sup>1,2,\*</sup>, С.А. Матющенко<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>)Омский государственный университет  
им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

<sup>2</sup>)Омский научный центр СО РАН, Омск, Россия

\*) e-mail: kvs\_docent@mail.ru

Основные закономерности роста слоев наноструктурированного углерода на поверхности хлорполимеров при воздействии мощного ионного пучка (МИП) в настоящее время не установлены и для их выяснения требуется более детальное исследование процесса роста при изменении термодинамических свойств полимера перед облучением.

Целью настоящей работы является исследование влияния предварительной лазерной обработки хлорированного поливинилхлорида (ХПВХ), хлорированного полиэтилена (ХПЭ) с каталитическими добавками на рост углеродных нановолокон (УН) при воздействии МИП.

Предварительная обработка выполнена на воздухе с использованием лазерного модуля NEJE N40630 (длина волны 450 нм, минимальная длительность импульса 10 мкс, оптическая мощность до 7,5 Вт, скорость сканирования до 1000 мм/мин). Ионное облучение проводилось на ускорителе «Темп» (30% H<sup>+</sup> +70% C<sup>+</sup>, E ~ 200 кэВ, j ≤ 150 А/см<sup>2</sup>, τ=60 нсек).

Установлено, что лазерное облучение вызывает дегидрохлорирование поверхностного слоя хлорполимеров, степень которого зависит от интенсивности лазерного излучения и скорости сканирования. Толщина дегидрохлорированного слоя существенно превышает пробег ионов пучка. Это приводит к изменению размеров, образующихся при облучении МИП углеродных нановолокон, и к снижению содержанию хлора в поверхностном углеродном слое. Обсуждены возможные механизмы наблюдаемых эффектов. Работа выполнена по государственному заданию ОНЦ СО РАН (номер госрегистрации проекта 121121700062-3).

## УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМОВ, РАСПЫЛЁННЫХ ПУЧКОМ ГАЗОВЫХ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ

А.В. Назаров<sup>1,2,\*</sup>, В.С. Черныш<sup>1,2)</sup>, А.Е. Иешкин<sup>2)</sup>,  
Д.С. Киреев<sup>1,2)</sup>, Миннебаев Д.К. <sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup> Московский государственный университет имени  
М.В. Ломоносова, научно-исследовательский институт ядерной физики имени  
Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

<sup>2)</sup> Московский государственный университет имени  
М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: av.nazarov@physics.msu.ru

Технология газовых кластерных ионов получила активное развитие в последние два десятилетия как в области модификации поверхности, так и в качестве аналитических методов.

Угловые распределения распылённых атомов являются важной характеристикой, изучение которой позволяет судить о механизмах взаимодействия кластеров с твёрдым телом. Общеизвестны «латеральные» угловые распределения распылённых атомов, которые характеризуются максимумом при больших углах от нормали к поверхности мишени.

В данной работе были экспериментально получены угловые распределения атомов меди и вольфрама, распылённых кластерами  $Ag_n$ ,  $Kr_n$ , и  $Xe_n$ . Показано, что угловые распределения могут отличаться от латеральных. Для детального изучения механизмов формирования угловых распределений проведено компьютерное моделирование молекулярной динамики. Изучены зависимости процесса передачи энергии от кластера атомам мишени и угловых распределений от сорта атомов кластера и мишени, а также от энергии и размера кластера.

### ЛИТЕРАТУРА

1. A. V. Nazarov, V. S. Chernysh, A. D. Zvilgelsky et al. // Surfaces and Interfaces, 2021, № 26, 101397.
2. V. S. Chernysh, A. E. Ieshkin, D. S. Kireev et al.// Surface and Coatings Technology, 2020, № 388, 125608.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАВЛЕННОГО КВАРЦА КЛАСТЕРАМИ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВ

Н.Г. Коробейщиков<sup>1\*)</sup>, П.В. Стишенко<sup>2)</sup>, И.В. Николаев<sup>1)</sup>,  
О.И. Пеньков<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>2)</sup> Омский государственный технический университет, Омск, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: korobei@ci.nsu.ru

Газоструйные ионно-кластерные пучки востребованы для модификации физико-химических свойств различных материалов и прецизионной диагностики поверхности [1, 2]. Однако, особенности взаимодействия кластеров различных газов с поверхностью неорганических материалов практически не исследованы.

В данной работе с использованием МД-моделирования описаны результаты исследования распыления поверхности плавленого кварца ( $\text{SiO}_2$ ) кластерами благородных газов Ne, Ar и Kr при нормальном и наклонном ( $60^\circ$  от нормали) падении на мишень. Сравнивались кластеры размерами 561 и 923 атомов/кластер при варьировании удельной кинетической энергии кластеров  $E/N$  от 10 до 140 эВ/атом в кластере. Показано, что энергия кластеров на единицу площади удара  $E/S$  и энергия на единицу массы кластеров  $E/M$  являются обобщающими параметрами для коэффициентов распыления. Во всех режимах наблюдается преимущественное распыление атомов кислорода. Селективность распыления значительно понижается с ростом удельной энергии  $E/N$  [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант №21-19-00046).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Yamada, Materials Processing by Cluster Ion Beams: History, technology, and application, CRC Press, 2016, 239 p.
2. А.Е. Иешкин, А.Б. Толстогузов, Н.Г. Коробейщиков, В.О. Пеленович, В.С. Черныш // УФН, 2022, Т. 192, № 7, с. 722.
3. N.G. Korobeishchikov, I.V. Nikolaev, P.V. Stishenko, V.V. Yakovlev // Plasma Chemistry Plasma Processing, 2023, Vol. 42, P. 1223.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ КЛАСТЕРНЫМИ ИОНАМИ АРГОНА  
МОНОКРИСТАЛЛА  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}^{3+}$

И.В. Николаев<sup>1,\*</sup>, Н.Г. Коробейщиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>\*</sup>) e-mail: i.nikolaev@nsu.ru

Монокристаллы вольфрамата, легированные трехвалентными ионами, широко используются в лазерной технике, оптоэлектронике, солнечных элементах и т.д., благодаря отличному коэффициенту усиления, низкому порогу генерации, химической стабильности и превосходным фотолюминесцентным свойствам [1–3]. Известно, что ионно-кластерный пучок эффективно применяется для модификации поверхности различных материалов при минимальном повреждении материала, глубиной единицы нанометров [4–5].

Приведены результаты по обработке высоко- и низкоэнергетическими кластерными ионами аргона поверхности монокристалла  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}^{3+}$ . Продемонстрировано, что в обоих случаях практически исчезли борозды, формируемые химико-механической полировкой. После низкоэнергетического режима шероховатость поверхности изменилась незначительно, что соответствует ультрагладкой оптической поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №21-19-00046) в части обработки образцов кластерными ионами и анализа и Минобрнауки РФ (грант FSUS-2020-0039) в части подготовки и анализа образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Chandra Talukder et al. // *Opt. Let.*, 2016, Vol. 41, P. 3810–3812.
2. W. Zhang et al. // *Mater. Res. Bull.*, 2020, Vol. 122, 110689.
3. Brenier // *J. Quant. Elect.*, 2011, Vol. 47, P. 279–284.
4. N. Toyoda and I. Yamada // *AIP Conference Proceedings*, 2006, Vol. 866, P. 210–213.
5. N. G. Korobeishchikov et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2019, Vol. 438, P. 1–5.

## ФОРМИРОВАНИЕ SERS ПОДЛОЖЕК НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК СЕРЕБРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ

Д.С. Киреев<sup>1,\*</sup>, А.Е. Иешкин<sup>1</sup>, О.А. Стрелецкий<sup>1</sup>, М.В. Самоделова<sup>2</sup>,  
Н.Р. Яренков<sup>2</sup>, Д. Р. Бессмертный<sup>1</sup>, И. Н. Кутлусурин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>) Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>\*</sup>) e-mail: dmtr.kireeff6497@yandex.ru

Поверхностно-усиленное рамановское рассеяние света (SERS) является мощным и высокоселективным инструментом, позволяющим химически идентифицировать и определять структуру материалов и молекул [1]. Ионные пучки позволяют формировать поверхностные наноструктуры с заданными параметрами, которые могут быть использованы в качестве SERS подложек [2]. В данной работе описаны наноструктуры, формирующиеся под действием пучка кластерных ионов  $Ar_{1000}^+$  при наклонном и нормальном падении на 40 нм пленку серебра на кремниевой подложке. Показано, что параметрами наноструктур, такими как форма и размер, можно управлять, изменяя ионный флуенс. Полученные наноструктуры на 4 порядка усиливают сигнал рамановского спектра.

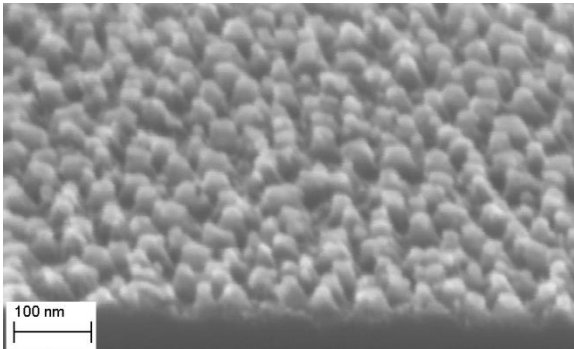


Рис.1. СЭМ изображение серебряных наноструктур на поверхности кремния, сформированных под действием кластерных ионов  $Ar_{1000}^+$  с энергией 10 кэВ при нормальном падении.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00310.

### ЛИТЕРАТУРА

1. D.-Y. Wu, J.-F. Li, B. Ren, Z.-Q. Tian // Chem. Soc.Rev. 2008, 37, 1025–1041.
2. J. Langer et al. // ACS Nano, 2020, 14, 1, 28–117.

ВЛИЯНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА РЕЗУЛЬТАТ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАДЕНИЯ ИОНА  $C_{60}$  НА ПОВЕРХНОСТЬ  
МОНОКРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ

К.П. Карасев<sup>1)</sup>, Д.А. Стрижкин<sup>2)</sup>, П.А. Карасев<sup>2\*)</sup>

<sup>1)</sup> Академический ун-т им. Ж.И.Алферова, СПб, Россия

<sup>2)</sup> Политехнический ун-т Петра Великого, СПб, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: platon.karaseov@spbstu.ru

Экспериментально установлено, что при бомбардировке твердотельных мишеней ускоренными ионами  $C_{60}^+$  с энергиями порядка 10 кэВ может наблюдаться как рост углеродных пленок, так и распыление. Превалирование того, или иного процесса определяется свойствами вещества мишени, температурой, дозой ионов и составом остаточных газов в рабочей камере. Механизмы происходящих при этом процессов до сих пор остаются невыясненными. Существенную роль должны играть развитие и термализация каскадов столкновений, формируемых при падении иона на поверхность. Одним из широко распространенных методов анализа быстрых (время развития и термализации обычно не превышает 20 пс) каскадных процессов является метод Молекулярно-Динамического (МД) моделирования. Важным вопросом при этом является выбор межатомного потенциала, который бы корректно описывал свойства исследуемой системы. Для описания взаимодействия атомов кремния и углерода, был разработан широко признанный потенциал Терсофа. Взаимодействие между атомами углерода и свойства углеродных структур лучше воспроизводятся потенциалом Airebo.

В докладе будет выполнено сравнение результатов моделирования падения одиночных молекул  $C_{60}$  на (100) поверхность Si, полученных с использованием приведенных потенциалов для энергий падающих ионов в диапазоне от 2 до 14 кэВ, температуре системы от 0 до 1000 К. Показано, что описание каскадных процессов, в основном, совпадают. Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2023-0016).

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ ФТОРИРОВАННОГО ФУЛЛЕРЕНА $C_{60}(CH_2F)_{12}$

В.Е. Пуха<sup>1\*</sup>, А.А. Бельмесов<sup>1</sup>, Е.Н. Кабачков<sup>1</sup> Г.В. Нечаев<sup>1</sup>, И.Н.

Лукина<sup>2</sup>, Е.И. Дроздова<sup>2</sup>, О.П. Черногорова<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>) ФИЦ ПХФ и МХ РАН Черноголовка, Россия

<sup>2</sup>) ИМЕТ РАН, Москва, Россия

<sup>\*</sup>) e-mail: pve@icp.ac.ru

В докладе представлены первые результаты, осаждения покрытий из ускоренных ионов  $C_{60}(CH_2F)_{12}$ . Известно, что осажденные из ионов  $C_{60}$  сверхтвердые наноконпозиты обладают рядом уникальных свойств (биосовместимость и гидрофобность, низкий коэффициент трения и малый износ /1/). Добавка фтора в углеродные структуры модифицирует химические связи в покрытии, что в значительной мере может повлиять на их свойства.

Для осаждения покрытий использован ионный источник с седловидным электрическим полем. Пары  $C_{60}(CH_2F)_{12}$  из двух эффузионных ячеек направлялись в анодную область источника. При ускоряющем напряжении 6 кВ поджигался электрический разряд, из которого формировались два противоположно направленных пучка ионов для осаждения покрытий. Один из пучков при этом проходил через масс-спектрометр. Осаждение происходило при комнатной температуре подложек в вакууме не хуже  $5 \cdot 10^{-5}$  Па. Состав покрытий и структура химических связей определялись методами РФЭС.

Ионы  $C_{60}(CH_2F)_{12}^+$  и  $C_{60}(CH_2F)_{12}^{++}$  регистрировались при температуре эффузионных ячеек выше  $200^\circ\text{C}$ . Значительного количества фрагментов молекул не наблюдалось до  $300^\circ\text{C}$ . В покрытиях, полученных из  $C_{60}(CH_2F)_{12}^+$  и из пучка без масс-сепарации обнаружено  $\sim 4\%$  ат. фтора. Во втором случае в покрытии содержится большее количество  $sp^3$  связей ( $sp^3/sp^2 \sim 0,75$  против 0,33). Измерения характеристик смачивания показало, что в обоих случаях контактные углы близки и составляют  $\sim 76-78^\circ$ .

Работа выполнена по теме Гос. задания, № гос. регистрации АААА-А19-119061890019-5, темкарта 00892019-007.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. O.V Penkov, V.E. Pukha, S.L. Starikova, M. Khadem, V.V. Starikov, M.V. Maleev, D.E. Kim//Biomaterials,(2016), 102, 130



ЭЛЕКТРОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОПЛЕНОК NiSi<sub>2</sub>/Si,  
ПОЛУЧЕННЫХ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ Ni В Si В СОЧЕТАНИИ С  
ОТЖИГОМ

Н.М. Мустафоева<sup>1\*)</sup>, Н.М.Мустафаева<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Каршинский институт ирригации и агротехнологий, 180003, г. Карши,  
Узбекистан

<sup>2)</sup> Каршинский инженерно-экономический институт, 180003, г. Карши,  
Узбекистан

\*) e-mail: mustafoevan@gmail.com

Особый интерес представляет получение многослойных МДП-структур. Создание таких структур в наноразмерном масштабе требует близости параметров кристаллических решеток этих материалов. В качестве металла наиболее часто используются силициды металлов, которые обладают металлическими свойствами (низкая ширина запрещенной зоны и малое удельное сопротивление  $\rho$ ). В таблице приведены значения ширины запрещенной зоны и параметры решетки силицидов металлов, широко используемых в создании приборов микро-, нано- и оптоэлектроники; данные структуры получены методом ТФЭ в сочетании с отжигом. Толщины пленки составляют ~200-250 Å.

Значение  $E_g$ ,  $\rho$  и параметров решетки MeSi<sub>2</sub>

Параметр	Si	CoSi <sub>2</sub> /Si	NiSi <sub>2</sub> /Si	BaSi <sub>2</sub> /Si	NaSi <sub>2</sub> /Si
$E_g$ , эВ	1,12	0,5	0,58	0,7	0,65
Параметр решеток, Å	5,43	5,37	5,42	6,71	8,9
$\rho$ , мкОм·см	$5 \cdot 10^6$	40	50	100-120	-

Видно, что  $E_g$  для всех силицидов металлов лежит в пределах 0,5-0,7 эВ а постоянные решетки CoSi<sub>2</sub> и NiSi<sub>2</sub> хорошо согласуются с постоянной решеткой Si. Отметим, что в настоящее время структура и свойства CoSi<sub>2</sub>/Si изучаются более подробно, поэтому в данной работе основное влияние уделено получению и изучению состава, структуры и свойств системы NiSi<sub>2</sub>/Si.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Umirzakov, B.E., Tashmukhamedova, D.A., Tashatov, A.K., Mustafоеva, N.M. Technical Physics, 2019, 64(5), 708–710

## ВЛИЯНИЕ ПОСЛЕРОСТОВОГО ПРОГРЕВА НА МОРФОЛОГИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{NiSi}_2/\text{Si}(111)$

Н.М. Мустафоева, Ф.П. Санакулов

Каршинский институт ирригации и агротехнологий, г. Карши, Узбекистан  
e-mail: mustafoevan@gmail.com

Нанопленочные гетероструктуры типа  $\text{MeSi}_2/\text{Si}$  являются предметом интенсивного исследования, вследствие перспективности их в создании МДП, ПДП-структур для СВЧ-транзисторов и ИС, детекторов излучения, оптоэлектронных приборов, тонких омических контактов и барьерных структур. Электронная структура, оптические и электрические свойства гетероструктур  $\text{MeSi}_2/\text{Si}$ , прежде всего, зависят от состава и размеров нанобъектов.

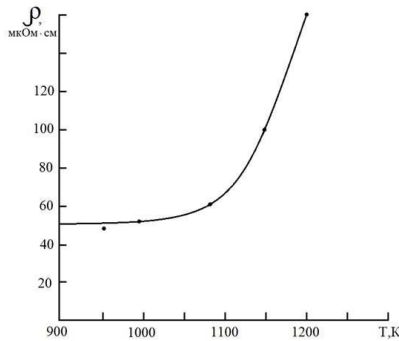


Рис.1. Зависимость  $\rho$  от  $T$  для системы  $\text{NiSi}_2/\text{Si}(111) \cdot d_{\text{NiSi}_2} = 50 \text{ \AA}$

Эти утверждения подтверждаются данными рисунка, где приводится зависимость  $\rho(T)$  для системы  $\text{NiSi}_2/\text{Si}(111)$ . Видно, что до  $T \approx 1100 \text{ K}$  значение  $\rho$  пленки  $\text{NiSi}_2$  заметно не меняется, т.е. пока ещё не происходит образования островков. При  $T \geq 1150$  происходит резкое увеличение  $\rho$ , что характерно для островковых пленок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Tashatov A.K. Mustafоеva N.M. // Surface Morphology of  $\text{NiSi}_2/\text{Si}$  Films Obtained by the Method of Solid-Phase Deposition // Journal of Surface Investigation: X-ray, 2020, Vol.14, No 1, pp.81-84.

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОРОГИ ОТРИЦАТЕЛЬНО-ИОННОГО АТОМАРНОГО И КЛАСТЕРНОГО РАСПЫЛЕНИЯ ЩГК КВг ИОНАМИ ЦЕЗИЯ

Б.Г. Атабаев<sup>1)</sup>, Р. Джаббарганов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУ 1,  
Ташкент, Узбекистан

Методом статического СВВ ВИМС исследованы температурные зависимости атомарного и кластерного распыления ЩГК КВг ионами цезия. Показано, что выходы атомарных и молекулярных ионов решетки калия и брома экспоненциально возрастают на два порядка в диапазоне температур от комнатной до 600<sup>0</sup>С, в то время как кластерные отрицательные ионы брома имеют температурные пороги распыления и увеличиваются на два порядка при нагреве выше 200<sup>0</sup>С. Выход молекулярных ионов брома возрастает в 4 раза, кластеров тримеров брома возрастает в три раза, решеточные калий-бром возрастают в 6 раз, димеры калия возрастают в 4 раза.

Таким образом при повышении температуры распыления ЩГК кластеров наблюдается экспоненциальный рост, что указывает на закономерность Аррениуса термостимулированного распыления атомов и кластеров ЩГК.

Эффективное распыление кластеров с большим числом атомов калия и брома и их кластеров объясняется отжигом точечных дефектов и развитием нелинейных каскадов смещения при несимметричных столкновениях двухкомпонентной мишени.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОРОГИ ОТРИЦАТЕЛЬНО-ИОННОГО АТОМАРНОГО И КЛАСТЕРНОГО РАСПЫЛЕНИЯ ЩГК КВr ИОНАМИ ЦЕЗИЯ

Р. Джаббарганов<sup>1)</sup>, Б.Г. Атабаев<sup>1)</sup>, А.С. Халматов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУ 1,  
Ташкент, Узбекистан

Методом статического СВВ ВИМС исследованы энергетические зависимости атомарного и кластерного распыления ЩГК КВr ионами цезия. Показано, что выходы атомарных и молекулярных ионов решетки брома экспоненциально возрастают на один порядок в диапазоне энергий 100-3000 эВ, в то время как кластерные отрицательные ионы брома имеют энергетические пороги распыления 1000 эВ и увеличиваются на порядок при энергии 3000 эВ. Выход атомарных и молекулярных ионов калия возрастает в 5 раз, кластеров тримеров брома возрастает в 15 раз, решеточные калий-бром возрастают в 12 раз, в диапазоне энергий 1500-3000 эВ.

Таким образом при повышении энергии бомбардирующих ионов цезия распыление атомарных и кластерных отрицательных наблюдается экспоненциальный рост, что указывает на процессы термостимулированного распыления атомов и кластеров ЩГК.

Эффективное распыление кластеров с большим числом атомов калия и брома и их кластеров объясняется отжигом точечных дефектов и развитием нелинейных каскадов смещения тепловых пиков при несимметричных столкновениях двухкомпонентной мишени.

## КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПЫЛЕНИЯ W ЛЕГКИМИ ПРИМЕСЯМИ

В.С. Михайлов\*, П.Ю. Бабенко, А.Н. Зиновьев  
 ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия  
 \* e-mail: chiro@bk.ru

Проведены расчеты коэффициентов распыления  $W$  (материала дивертора в токамаке ИТЭР) ионами примесей He, Be, N, O и Ne для энергий соударения 100 эВ - 10000 эВ.

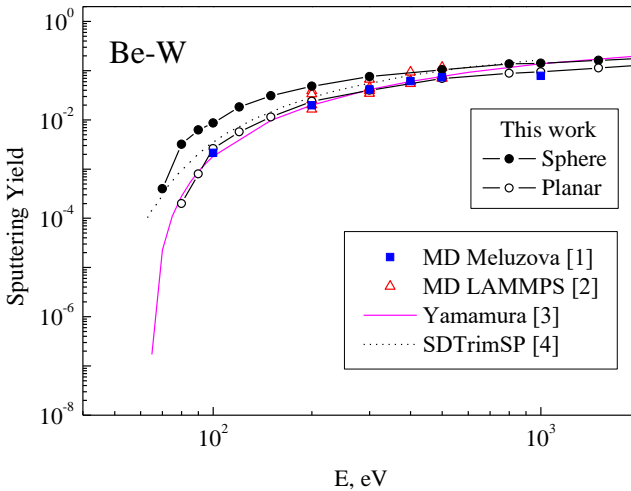


Рис.1 Зависимость коэффициента распыления  $W$  при бомбардировке ионами Be от энергии соударения. Наш расчет для сферического барьера (spherical) и для плоскостного барьера (planar).

Как видно из рис.1 наш расчет для плоскостного поверхностного барьера (planar) хорошо согласуется с расчетами методом молекулярной динамики [1,2] и расчетами Ямамуры [3]. Расчет программой SDTrimSP [4] дает другое значение порога распыления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Д.С. Мелузова, П.Ю. Бабенко, А.Н. Зиновьев, А.П. Шергин // Письма в ЖТФ, 2020, том 46, вып. 24, с.19.
2. X. Yang, A. Hassanein // Appl. Surf. Sci., 2014, v. 293, p.187.
3. Y. Yamamura, H. Tawara // Atom. Data Nucl. Data Tabl., 1996, v.62, p.149.
4. S. Brezinsek // J. Nucl. Mater., 2015, v.463, p.11.

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДСИСТЕМЫ НА ЭКРАНИРОВКУ ПОТЕНЦИАЛА ПРИ РАССЕЯНИИ ИОНОВ В МЕТАЛЛАХ

П.Ю. Бабенко\*, В.С. Михайлов, А.Н. Зиновьев  
 ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия  
 \* e-mail: babenko@npd.ioffe.ru

В нашей работе [1] на основе анализа энергетических и угловых распределений обратно отраженных частиц от поверхности Au был получен потенциал для системы H-Au. Полученный потенциал заметно отличается от DFT потенциала применяемого для описания рассеяния в газовой фазе. Мы предположили, что наблюдаемое отличие связано с возмущением электронной подсистемы металла налетающим ионом.

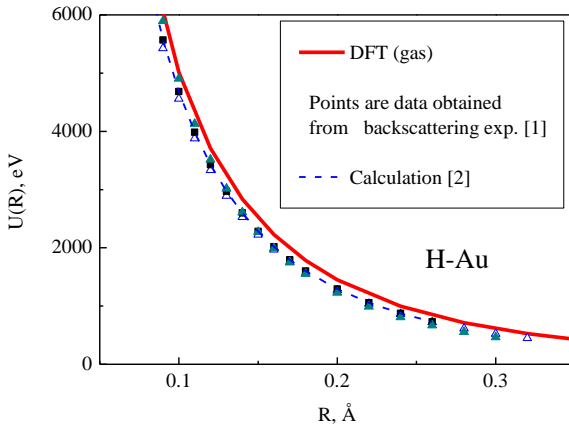


Рис.1 Потенциал взаимодействия для системы H-Au: DFT - данные для газовой фазы, точки - данные, полученные обработкой эксперимента по обратному рассеянию [1], штриховая кривая - расчет по формуле из работы [2].

В работе [2] была предложена формула для учета этого эффекта, которая подтверждает наблюдаемое отличие.

### ЛИТЕРАТУРА

1. П.Ю. Бабенко, А.Н. Зиновьев, В.С. Михайлов, Д.С. Тенсин, А.П. Шергин // Письма ЖТФ, 2022, т.48, в.14, с.10.
2. Г.В. Дедков // УФН, 1995, т.165, в.8, с.919.

## ЗАВИСИМОСТЬ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ОТ РАЗМЕРА КРИСТАЛЛИТА

В.С. Михайлов\*, П.Ю. Бабенко, А.Н. Зиновьев  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия  
\* e-mail: chiro@bk.ru

В эксперименте [1] наблюдалось отличие углового распределения частиц, прошедших тонкую пленку, от расчета многократного рассеяния в случае наличия кристаллитов с размером зерна более 100 Å.

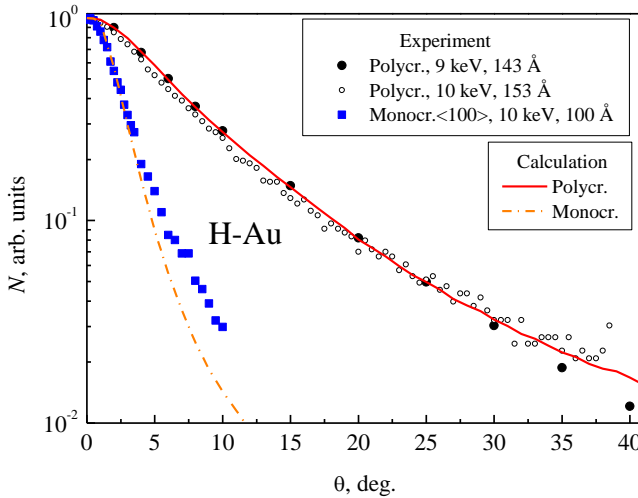


Рис.1 Угловые распределения атомов H после прохождения пленки из золота [2] для двух случаев - монокристаллической пленки толщиной 100 Å и поликристаллической пленки толщиной 143 Å и 153 Å.

Как видно из рис.1, угловые зависимости для поликристаллической и монокристаллической пленки заметно отличаются. Результаты моделирования угловых зависимостей для различных размеров кристаллита будут представлены на конференции.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Н.Н. Andersen, J. Bottiger, Н. Knudsen, P. Moller Petersen // Phys. Rev. A, 1974, v.10, iss.5, p.1568.
2. П.Ю. Бабенко, А.Н. Зиновьев, Д.С. Тенсин // Журнал технической физики, 2022, т.92, в.11, с.1643.

## ФОКУСИРОВКА ПУЧКА ИОНОВ ВОДОРОДА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ КРИСТАЛЛ W

В.С. Михайлов, П.Ю. Бабенко, А.Н. Зиновьев\*  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия  
\* e-mail: zinoviev@inprof.ioffe.ru

В работе [1] моделировалось прохождение пучка D через кристалл W(100). При начальных энергиях более 1 кэВ наблюдалась компонента, соответствующая каналированию частиц в кристалле. При энергии 100 кэВ наблюдалась устойчивая пространственная структура пучка каналированных ионов. Критический угол захвата в канал для данного случая  $3.3^\circ$ .

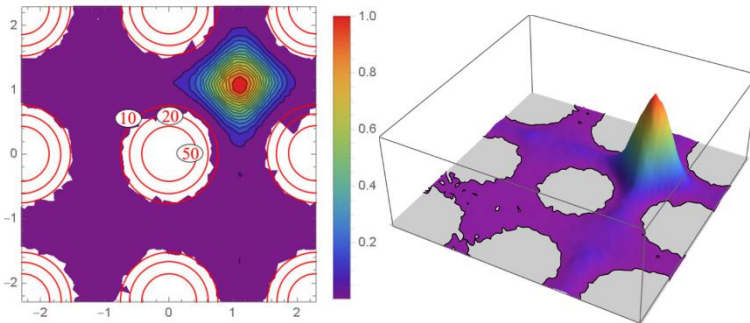


Рис.1 Пространственное распределение потока каналированных частиц при засветке одного канала. В пустые области каналированные частицы не проникают. Кружками с надписями 10, 20 и 50 отмечены области значения непрерывного потенциала с энергиями 10, 20 и 50 эВ.

Нами были рассчитаны значения непрерывного потенциала (усредненного вдоль атомных цепочек) используя DFT потенциал для системы D-W. Взяв значение потенциала для границы пустой области 10 эВ, можно оценить угол максимального отклонения частиц каналированного пучка  $\psi$ . В нашем случае  $\psi=0.57^\circ$ , что заметно меньше критического угла каналирования. Это означает, что вследствие тепловых колебаний и многократных столкновений каналированных частиц с атомами цепочек кристалла имеет место фокусировка пучка.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. D.S. Meluzova, P.Yu. Babenko, A.P. Shergin, A.N. Zinoviev // Tech. Phys. Lett., 2020, v.46, p.235.



СЕЧЕНИЯ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ И ЯДЕРНЫЕ ТОРМОЗНЫЕ СПОСОБНОСТИ ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ Be ИЗОТОПАМИ ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ

И.С. Дуплийчук, П.Ю. Бабенко\*, В.С. Михайлов, А.Н. Зиновьев  
 ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия  
 \* e-mail: babenko@npd.ioffe.ru

Проведены расчеты сечений передачи энергии и ядерные тормозные способности при бомбардировке Be изотопами водорода и гелия.

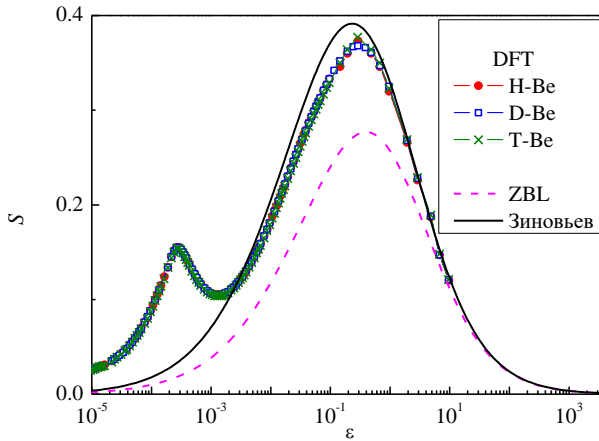


Рис.1 Сечения ядерного торможения в зависимости от энергии налетающей частицы для столкновений изотопов водорода с мишенью из бериллия в универсальных координатах [1]. Приведен также расчет с использованием потенциалов ZBL и Зиновьева.

При расчетах использовался DFT потенциал с коррекцией параметров потенциальной ямы. Первый пик на рис. 1 связан с рассеянием на притягивающей яме и ранее не учитывался. Как видно из рис. 1 данные для разных изотопов в координатах Линдхарда [1] укладываются на одну кривую. Полученные данные нужны при расчетах имплантации ионов в веществе, а сечение передачи энергии используется при моделировании распыления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. J. Lindhard, M. Scharff, H.E. Schiott // Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk., 1963, v.33, p.1.

**СОСТАВ, ЭЛЕКТРОННЫЙ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
НАНОКРИСТАЛЛЫ И НАНОПЛЕНОК СИЛИЦИДОВ МЕТАЛЛОВ,  
МЕТОДОМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ**

Болтаев Х.Х.<sup>1)</sup>, Абдувайитов А.А.<sup>1)</sup>, Розиков Г.А.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Ташкентский государственный технический университет, Ташкент,  
Узбекистан

<sup>2)</sup>Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности,  
Ташкент, Узбекистан  
khurshid.boltaev@gmail.com

В [1–2] было установлено, что низкоэнергетическая ионная бомбардировка в сочетании с отжигом позволяет при низких дозах облучения ( $D \leq 10^{15} \text{ см}^2$ ) получить отдельные нанокристаллические фазы на поверхности Si, а при высоких дозах – сплошную однородную пленку. Объектами исследования являлись монокристаллические образцы n-типа Si(111). Имплантация активных ионов проводилась с энергией  $E_0 = 0,5\text{--}5 \text{ кэВ}$  при дозе насыщения ( $D = (6\text{--}8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ).

Спектры фотоэлектронов для Si(111), имплантированного ионами  $\text{Ba}^+$  с  $E_0 = 0,5 \text{ кэВ}$  при  $D = D_n = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  содержит особенности характерные как для соединения  $\text{Ba} + \text{Si}$ , так и для свободных (избыточных) атомов Ba и Si. После прогрева при  $T = 1100 \text{ К}$  концентрация свободных атомов Ba и Si уменьшается до нуля и формируется сплошная монокристаллическая нанопленка  $\text{BaSi}_2$  с толщиной  $\sim 25\text{--}30 \text{ \AA}$ . Увеличивая энергии ионов  $\text{Ba}^+$  до  $\sim 5 \text{ кэВ}$  можно получить нанопленки  $\text{BaSi}_2$  с толщиной  $60\text{--}80 \text{ \AA}$ . Из таблицы видно, что с случае НК фаз с  $d \approx 15\text{--}20 \text{ нм}$  и  $h = 3\text{--}4 \text{ нм}$  значение  $E_g$  силицидов в 1,5 ближе, чем  $E_g$  нанопленок данного силицида.

Силицид	d, нм	b, нм	h, нм	$E_g$ , эВ	$\kappa$ , эВ	$k^*$
$\text{BaSi}_2$	20-25	45-50	4-4,5	0,7	3,1	$3 \cdot 10^{-3}$
	30-40	45-50	4-4,5	0,7	3,2	
	Сплошная пленка		3-4	0,57	3,4	

$k^*$  - квантовый выход фотоэлектронов при  $h\nu = 8,2 \text{ эВ}$

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Boltaev E.U., Dzhurakhalov A.A.// Mater. Sci. Eng. B.2003. V.101. P.124.
2. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Kurbanov Kh.Kh.// J.Surf. Investigation. X ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2011. V.5. №4. P.693.

## ВЛИЯНИЕ АДСОРБЦИИ АТОМОВ Ва НА СОСТАВ И ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ CdS

Умирзаков Б.Е., Абдувайитов А.А., Болтаев Х.Х., Содикжанов Ж.  
Ташкентский государственный технический университет, Ташкент,  
Узбекистан  
khurshid.boltaev@gmail.com

Монокристаллические образцы и плёнки  $A^2B^6$ , в особенности CdS и многослойные гетероструктуры на их основе широко используются в создании различных приборов микро-, нано- и оптоэлектроники, в том числе солнечной энергетики [1–2].

Объектами исследования являлись монокристаллические пленки CdS п-типа с толщиной  $\sim 1 \mu\text{m}$ . Исследования проводились с использованием методов оже-электронной спектроскопии (ОЭС), фотоэлектронной спектроскопии (ФЭС).

Зависимости работы выхода  $e\phi$ , интенсивности фототока  $I_F$  и глубины зоны выхода истинно-вторичных электронов (фотоэлектронов)  $\lambda$  от толщины слоя  $d$  бария для CdS с поверхностной пленкой Ва. Видно, что зависимость  $e\phi(d)$  проходит через минимум, а зависимости  $I_F(d)$  и  $\lambda(d)$  проходят через максимум при  $d \approx 2,5\text{--}3 \text{ \AA}$  ( $\theta \approx 1$  монослой). Известно, что уменьшение  $e\phi$  способствует выходу электронов термализованных вблизи уровня вакуума, следовательно, увеличивается глубина выхода истинно-вторичных и фотоэлектронов. С ростом  $d$  значение  $e\phi$  увеличивается и при  $d \approx 5\text{--}6 \text{ \AA}$  составляет  $\sim 2,3 \text{ eV}$ . Дальнейший рост  $d$  не приводит к заметному изменению  $e\phi$ . Значение  $I_F$  начиная с  $d \approx 3 \text{ \AA}$  уменьшается монотонно и при  $d \approx 13\text{--}15 \text{ \AA}$  его значение становится меньше, чем  $I_F$  чистого CdS. Можно полагать, что эмиссионная эффективность слоев Ва значительно меньше, чем эффективности слоев CdS. Что касается  $\lambda$ , то её значение при  $d \approx 8\text{--}10 \text{ \AA}$  уменьшается до  $\lambda$  чистого CdS и с дальнейшим ростом  $d$  заметно не меняется. Впервые изучено влияние адсорбции атомов Ва с толщиной  $\sim 1\text{--}15 \text{ \AA}$  ( $\theta \approx 0,5\text{--}5$  монослоев) на состав, эмиссионные и оптические свойства CdS.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Г.С. Хрипунов, В.Р. Копач, А.В. Мериуц, Р.В. Кириченко, Н.В. Дейнеко, ФТП, 45 (1) С.1564 (2011).
2. Б.Е.Умирзаков, Д.А.Ташмухамедова, Э.А.Раббимов, Ж.Содикжанов, А.Н.Уроков, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 12, С.76-80 (2019).

## ЭВОЛЮЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА ПРИ САМОРАСПЫЛЕНИИ

Н.Н. Андрианова<sup>1,2,\*</sup>, Борисов А.М.<sup>1,2,3</sup>, Воробьева Е.А.<sup>1</sup>, Овчинников М.А.<sup>1</sup>, Слепцов В.В.<sup>2</sup>, Цырков Р.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>) НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

<sup>2</sup>) МАИ (НИУ), Москва, Россия

<sup>3</sup>) МГТУ Станкин, Москва, Россия

\*) e-mail: andrianova\_nn@mail.ru

Экспериментально изучена эволюция поверхности углеродных волокон из полиакрилонитрила (ПАН) при самораспылении ионами углерода с энергией 30 кэВ в условиях динамического отжига радиационных нарушений при повышенных температурах мишеней от 200 до 600°C. Для исследования изменений морфологии и микроструктуры использовали растровую электронную микроскопию и спектроскопию комбинационного рассеяния света. Сравнение с ранее изученными случаями облучения ионами инертных газов и азота /1/ показывает, что ионно-индуцированные процессы формоизменения /2/ не приводят при облучении ионами углерода к периодическому гофрированному рельефу. Найдено, что при самораспылении поверхностный облучаемый слой полностью заменяется слоем имплантированного углерода, структура которого может и, действительно, отличается от структуры текстурированной оболочки волокна. Облучение при температуре 400 и 600°C приводит к двум видам морфологических элементов. В начале облучения образуются продольные гребни, которые затем становятся менее отчетливыми из-за распыления. При достаточно большом флюенсе на всей поверхности волокна наблюдается относительно гладкий слой с чешуйчатой микроструктурой поликристаллического графита.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Казаков В.А. и др. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2020. Т. 84. № 6. С. 857.
2. Virgil'ev Yu.S., Kalyagina I.P. // Inorganic Materials. 2004. V40. S.33.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЫЛЕНИЯ  
ИОНИЗИРОВАННОЙ ПЛЁНКИ, ПОКРЫТОЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ Au(111)  
ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ИОНАМИ Ar<sup>+</sup>

У.О. Кутлиев<sup>\*</sup>, К.У. Отабаева, Д.У. Худойназарова  
Ургенчский госуниверситет, Ургенч, Узбекистан

<sup>\*</sup>) e-mail: uchkun@mail.ru

Приведены результаты исследования процесса распыления пленки воды, в составе которой существует адсорбированный ион Na<sup>+</sup>. Этот процесс представляет собой весьма интересный механизм распыления молекул воды и атомов золота в виде тяжелых кластеров. Ион натрия, расположенный внутри пленки, образует ионные связи с её молекулами. Эти связи в первую очередь зависят от заряда иона, т.е. если ион положительный, то вокруг него скапливаются отрицательные компоненты молекул, или наоборот. В наших расчетах был рассмотрен случай, когда ион Na<sup>+</sup> находится в верхней части пленки, состоящей из четырех слоёв льда на поверхности Au(111), которая состоит из 1980 атомов, расположенных в девяти слоях. Система была сбалансирована в течение 25 пикосекунд, причём внешние воздействия в данном случае не учитывались. Этого времени достаточно для того, чтобы ион приблизился к поверхности пленки и образовал ионные связи с атомами кислорода. В течение данного времени ион натрия полностью располагался в первом верхнем слое пленки. Визуально изучено распыление поверхности Au(111), покрытой ионизированной пленкой воды, при бомбардировке ионами Ar<sup>+</sup> с начальной энергией E<sub>0</sub>=700 эВ. Процесс взаимодействия мишени с падающей частицей продолжался в течение времени t=5 пикосекунд. При бомбардировке этой поверхности наряду с малыми кластерами воды образуется ионный кластер воды, состоящих из иона Na<sup>+</sup> и 45-65 молекул воды. Следует отметить, что этот большой сферический кластер не является устойчивым. Наши расчеты показали, что молекулы воды покидают ионный кластер при достижении времени столкновения порядка 3 пикосекунды. В течение этого промежутка времени кластер становится более устойчивым.

## ИЗМЕРЕНИЕ ИОННО-ФОТОННОЙ ЭМИССИИ ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ТА МИШЕНИ КЛАСТЕРНЫМИ И МНОГОЗАРЯДНЫМИ ИОНАМИ

Ш.Дж. Ахунов, П.Г. Кахрамонова, Д.Т. Усманов\*  
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз,  
Ташкент, Узбекистан  
\*) e-mail: usmanov@iplt.uz

В настоящей работе, с целью дальнейшего изучения особенностей вторично-эмиссионных явлений в условиях существования плотных нелинейных каскадов при кластерной бомбардировке в настоящей работе проводятся экспериментальные исследования эмиссии возбужденных атомов, релаксация которых приводит к излучению фотонов или ионно-фотонной эмиссии (ИФЭ).

Исследование проводилось на уникальной экспериментальной установке для исследования взаимодействия кластерных ионов с твердым телом, которое было модернизировано и дополнена системой измерения ИФЭ [1]. Оптическое излучение распыленных атомов собиралось из ореола вблизи поверхности мишени и регистрировалось с помощью высокоэффективного фотоумножителя ЕМ1 6256 В имеющего многощелочной катод с кварцевым окном, что позволяло регистрировать излучение в диапазоне 250 – 700 нм. Измерен выход ИФЭ при бомбардировке Та мишени кластерными и многозарядными ионами  $V_m^{q+}$  ( $m=1-5$ ), ( $q=1-6$ ). Наблюдается неаддитивный рост выхода ИФЭ с ростом количества атомов в бомбардирующих кластерных ионах. Неаддитивный рост интегральных коэффициентов ИФЭ с увеличением количества атомов и энергии бомбардирующих ионов предположительно связан с неаддитивностью коэффициента распыления. Кроме этого возможно влияние режима тепловых пиков при кластерной бомбардировке на процесс возбуждения распыленных атомов.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Sh.Dj. Akhunov, G.P. Kakhramonova, Sh.M. Axmedov, B.Sh. Kasimov, D.T. Usmanov. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B 528 (2022) 15–19

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ НАНОРЕЛЬЕФА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ГАЗОВЫМИ КЛАСТЕРНЫМИ ИОНАМИ

Д.Р. Бессмертный<sup>1\*)</sup>, Д.С. Киреев<sup>1,2)</sup>, А.Е. Иешкин<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2)</sup> НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: bessmertnyi.dr20@physics.msu.ru

В настоящее время большой интерес представляет исследование процессов, происходящих при облучении поверхности твердых тел кластерными ионами. В частности, исследуются возможности управляемой модификации нанорельефа: прецизионного сглаживания, корректирующего травления, самоорганизации упорядоченных структур /1/.

Процесс взаимодействия ускоренных кластеров с веществом пока не имеет исчерпывающего теоретического описания, позволяющего предсказать динамику формирования топографии поверхности. В настоящем докладе описана численная модель изменения рельефа в процессе бомбардировки, основанная на эмпирических закономерностях распыления кластерными ионами. Проведено сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными. Предлагаются алгоритмы корректирующего травления для получения структур заданной формы на основе предварительно сформированного рельефа.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 21-79-10224, <https://rscf.ru/project/21-79-10224/>

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А.Е. Иешкин, А.Б. Толстогузов, Н.Г. Коробейщиков, В.О. Пеленович, В.С. Черныш // УФН, 2022, 192, №7, с.722.

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПЫЛЕНИЯ КЛАСТЕРНЫМИ ИОНАМИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А.Е. Иешкин<sup>1\*</sup>, А.В. Назаров<sup>1</sup>, Ю.А. Ермаков<sup>2</sup>, В.С. Черныш<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>) НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>\*</sup>) e-mail: ieshkin@physics.msu.ru

Одним из способов управления нанорельефом, образующимся на поверхности в результате ионного облучения, является нагрев или охлаждение мишени /1/. Действительно, основными процессами, ответственными за формирование рельефа, являются распыление и поверхностная диффузия. В условиях повышенной температуры диффузия возрастает, в то время как коэффициент распыления атомарными ионами практически не меняется.

Однако ранее с помощью численного моделирования нами была обнаружено существенное влияние температуры мишени на величину коэффициента распыления газовыми кластерными ионами /2/. Было показано, что наиболее сильно такое влияние проявляется при распылении большими кластерами.

В настоящей работе для выяснения механизмов этого явления исследованы дифференциальные характеристики коэффициента распыления при облучении меди кластерами аргона при различных температурах. Энергия кластеров была зафиксирована и составляла 10 кэВ, размеры кластеров варьировались от 50 до 500 атомов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 21-79-10224, <https://rscf.ru/project/21-79-10224/>

Использовалось оборудование Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. A. Ieshkin, D. Kireev, K. Ozerova, B. Senatulin // *Materials Letters*, 2020, vol. 272, 127829
2. А.Е. Иешкин, А.Д. Завильгельский, М.Е. Беляев, А.В. Назаров // *ВМУ. Физика. Астрономия*, 2022, №4, с.30



## ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА И ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ Si ПРИ ОСАЖДЕНИИ ТОНКИХ СЛОЕВ Mn

И.Р. Бекпулатов, Б.Е. Умирзаков<sup>\*)</sup>, И.Х. Турапов, Ж.М. Жумаев  
Ташкентский государственный технический университет,  
Университетская 2, 100095, Ташкент, Узбекистан  
<sup>\*)</sup> e-mail: be.umirzakov@gmail.com

Напыление Mn осуществлялось на хорошо очищенную поверхность Si методом электронно-лучевого испарения чистого Mn при вакууме  $10^{-7}$  Па. Начальная часть оже – спектров, полученных при осаждении Mn с различной толщиной приведены на рис.1.

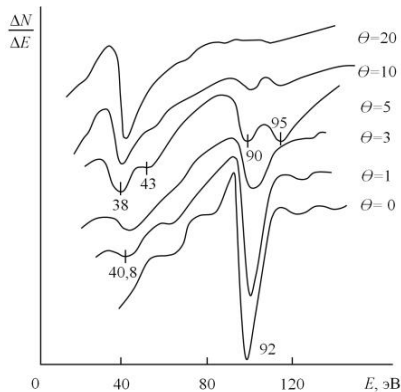


Рис.1. Влияние осаждения атомов Mn различной толщины  $\theta$  на оже – пик  $L_{23}VV$  кремния.

Видно, что при 1 МС форма и энергетическое положение Si  $L_{23}VV$  (92 эВ), практически, не меняются, наблюдается некоторое уменьшение его интенсивности. При этом в области 40-41 эВ появляется слабый широкий оже-пик Mn  $M_{23}VV$ . Уже при 3 МС оже-пик  $L_{23}VV$  Si уширяется и его интенсивность уменьшается в  $\sim 2$  раза. При 5 МС пик Si расщепляется на два с энергиями  $\sim 90$  и 95 эВ, а интенсивность пика Mn увеличивается и также расщепляется на два пика с 43 и 38 эВ. Наблюдаемые поведения оже-пиков Si и Mn указывают на образование химической связи между атомами Si и Mn. При 10 МС интенсивности пиков с 90 и 95 эВ резко уменьшаются и остается только оже-пик  $M_{23}VV$  с 38 эВ Mn. По-видимому, до 10-12 МС происходит интенсивная взаимодиффузия атомов на границе Mn-Si, приводящая к образованию химической связи типа  $Mn_xSi_y$ . Начиная с 10-12 МС диффундирующие атомы Si не достигают поверхности Mn. Из этого следует, что при комнатной температуре глубина диффузии Si в Mn составляет  $\sim 10$ -12 МС (20-24 Å). Вид оже-спектра при 20 МС, практически, не отличается от вида спектра массивной пленки Mn.

## СПЛАВНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ В ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ПЛАЗМЕ

А.И. Кудюкин, Е.Н. Моос

Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина, 390000 Рязань, ул. Свободы 46, Россия

E- mail: e.moos@365.rsu.edu.ru

Требование теплопроводности и эрозионной стойкости к электродам в дуговых камерах неразрешимо для одноатомных материалов. Поэтому нашли применение сплавы Cu-Cr (40%). Мало изучены при этом сведения об их поведении в вакуумном дуговом разряде, процессах на электродах; неизвестны изменения их состава и морфологии поверхности. На рис. 1,2 представлены такие характеристики в зоне действия вакуумной дуги, найденные в растровом микроскопе методом электрозондового микроанализа.

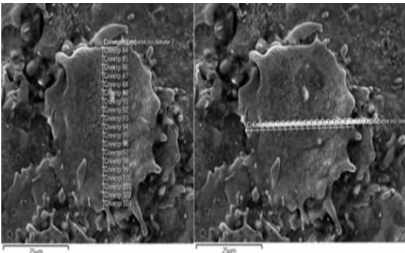


Рис.1. Морфология поверхности электрода.

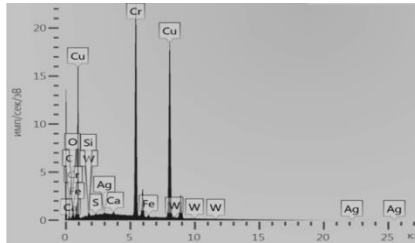


Рис.2. Атомный состав в зоне действия дуги.

Выявлено изменение атомной концентрации меди с 53,7 ат. % до 71,8 ат. % после воздействия дуги.

Показано, что причиной развития вакуумной дуги в остаточной атмосфере является адсорбированные слои на поверхности электродов и оболочке камеры. Масс-спектрометрический анализ обнаруживает фрагменты диффузионных масел вакуумной откачки типа  $C_xH_y$ ,  $N^+$  остаточной атмосферы, а также их многоатомных комбинации (рис.3). Обнаружена большая доля водородной компоненты (включая молекулы  $H_2^+$ ), возможного инициатора дугового разряда.

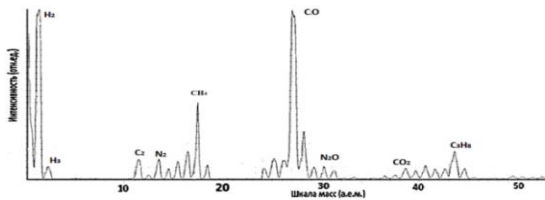


Рис.3. Состав остаточной атмосферы в вакуумной камере.

ПОВЕРХНОСТНО-ИОНИЗАЦИОННЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ  
ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ С УПРАВЛЯЕМОЙ СЕЛЕКТИВНОСТЬЮ

А.Ш. Раджабов\*, Г.П. Кахрамонова, Т.Х. Эрова, Т.Ш. Тоиров, Ш.М. Ахмедов,  
Ш.Дж. Ухунув, С.С. Исакова, Д.Т. Усманов\*\*

Институт Ионно-плазменных и лазерных, Ташкент, Узбекистан

\*e-mail: a.radjabov0217@gmail.com\*\*e-mail: usmanov@iplt.uz

Известно, что разработка высокочувствительных экспрессных прямых-селективных методов анализа биобразцов является одним из важных направлений аналитической химии. В настоящее время проводятся многочисленные научные и научно-технические работы по выяснению закономерностей селективности методов ионизации. К ним и относятся работы по применению явления поверхностной ионизации (ПИ) молекул органических соединений в анализе сложных многокомпонентных биообразцов без хроматографического разделения. В настоящее время известны три способа управления селективностью метода ПИ. Первый из них основан на подборе материалов для ПИ эмиттеров с различной каталитической активностью и работой выхода. Второй основан на управлении температуры эмиттера, тем самым управляя каналами гетерогенных химических реакций молекул на поверхности эмиттера и степенью ионизации частиц. Третий основан на управлении энергетических параметров единой квантово-механической системы адсорбированной молекулы-эмиттера с помощью внешнего электрического поля. К настоящему времени существуют многочисленные научные и научно-технические работы по применению первого и второго метода управления селективностью ПИ. Однако, механизм селективности метода ПИ под действием внешнего электрического поля все еще остается не выясненным. Поэтому цель настоящей работы является разработка механизмов и технологии управления уровнем селективности метода ПИ относительно органических соединений азотистого основания. Для этого нами разрабатывается опытный образец ПИ источника ионов, приспособленного работать при высоких значениях напряженности электрического поля. В докладе будут приведены схема и общий вид, а также результаты исследования эффективности ПИ источника ионов.

## ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В МАТЕРИАЛАХ, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

И.В. Амирханов, И. Сархадов<sup>\*</sup>, З.К. Тухлиев  
Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Московская  
область, Россия  
<sup>\*</sup>) e-mail: ibrohim@jinr.ru

Исследование взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с веществом является важным в связи с многими фундаментальными проблемами. В настоящее время, возрастает необходимость в создании и совершенствовании достоверных физических моделей, способных описывать различные процессы в веществе. При этом компьютерное моделирование занимает сейчас одно из главных мест в исследовании таких задач.

В предыдущей работе [1] была предложена модификация модели термического пика, базирующаяся на системе двух связанных гиперболических уравнений теплопроводностей для электронного газа и кристаллической решетки для моделирования тепловых процессов, возникающих в материалах под действием фемтосекундных лазерных импульсов. Численное моделирование проводилось в пределах времени действия источника.

В настоящей работе проведены численные исследования при больших временах после выключения источника для разных параметров релаксации потоков тепла в электронном газе и кристаллической решетки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-51-44001.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. И.В. Амирханов, И. Сархадов, З.К. Тухлиев. Моделирование тепловых процессов, возникающих в материалах под действием лазерных импульсов в рамках гиперболической модели термического пика. // Препринт ОИЯИ Р11-2022-31.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МАТЕРИАЛОВ В РАМКАХ МОДЕЛИ ТЕРМИЧЕСКОГО ПИКА

И.В. Амирханов<sup>1)</sup>, И. Сархадов<sup>1, \*)</sup>, З.К. Тухлиев<sup>1)</sup>, Х. Гафуров<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Объединенный Институт Ядерных Исследований,  
Дубна, Московская область, Россия

<sup>2)</sup>Худжандский государственный университет имени академика  
Бободжана Гафурова, Худжанд, Таджикистан

\*) e-mail: ibrohim@jinr.ru

В последние годы импульсная лазерная абляция различных материалов привлекает все больший интерес с точки зрения фундаментальных исследований процессов в веществе в экстремальных условиях сверхбыстрого подвода энергии: речь идет о построении новой физической теории, описывающей сильно нелинейные эффекты. Поэтому задача математического моделирования физических явлений в этой области становится чрезвычайно актуальным.

В предыдущей работе [1] проведено численное моделирование лазерной абляции материалов, возникающей под действием ультракоротких лазерных импульсов в полугограниченных образцах и образцах конечной толщины. Тепловой механизм лазерной абляции описывались в рамках одномерного нестационарного уравнения теплопроводности в системе координат, связанной с движущимся фронтом испарения.

В настоящей работе проведено аналогичное моделирование для полугограниченных образцах в рамках двухтемпературной модели термического пика, которая состоит из двух взаимосвязанных уравнений теплопроводностей для электронного газа и кристаллической решетки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. И.В. Амирханов, И. Сархадов, З.К. Тухлиев, Х. Гафуров. Численное исследование влияния конечной толщины образца на лазерной абляции материалов. // Препринт ОИЯИ Р11-2022-32.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ SRIM АНАЛИЗ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ  
ОБЛУЧЕНИИ Cu И Cu<sub>2</sub>O

С.У. Турапова<sup>1\*)</sup>, Ф.Д. Акбарова<sup>2)</sup>, М.А. Каримов<sup>3)</sup>, Р.Джаббарганов<sup>4)</sup>,  
А.У.Турапова<sup>5)</sup>, У.Б. Шаропов<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup>Институт материаловедения, АНРУз, Ташкент, Узбекистан

<sup>2)</sup>Физико-технический институт, АНРУз, Ташкент, Узбекистан

<sup>3)</sup>Ташкентский государственный технический университет  
им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

<sup>4)</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АНРУз,  
Ташкент, Узбекистан

<sup>5)</sup>Ташкентский Государственный Экономический Университет,  
Ташкент, Узбекистан

<sup>6)</sup>Национальный исследовательский институт возобновляемых источников  
энергии, Ташкент, Узбекистан

\*) e-mail: utkirstar@gmail.com

Для установления влияния окиси на дефектообразование при изменении поверхностного состава кристаллов меди при ионном облучении методом молекулярной динамики проведены сравнительные исследования продуктов дефектообразования с кристалла Cu и Cu<sub>2</sub>O.

Для компьютерного моделирования траектории ионов в сплошных средах применялся один из наиболее известных программных пакетов SRIM [1] (the Stopping and Range of Ions in Matter - Остановка и прохождение ионов в твердом теле).

Полученные данные образования вакансий, внедренных и междоузельных дефектов при распылении меди и оксида меди атомами цезия 1 кэВ при перпендикулярном падении, показали незначительное изменение в распределении и концентрации образованных дефектов.

Также величины коэффициента распыления N<sub>Cu<sub>2</sub>O</sub> и N<sub>Cu</sub> тоже заметно не изменяются из-за того, что плотности вещества обоих образцов почти одинаковые (8,9г/см<sup>3</sup> против 6,45г/см<sup>3</sup>), которые влияют на другие нужные коэффициенты программы SRIM.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. <http://www.srim.org>

## НИКЕЛЕВАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ВЫСОКОГО ИНДЕКСА ДЛЯ СИНТЕЗА ГРАФЕНА

Т.Э. Журабоев<sup>1\*</sup>), У.Б. Улжаев<sup>1)</sup>, У.Б. Халилов<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup> Институт ионно-плазменных и лазерных технологий  
АН РУз, Ташкент, Узбекистан

<sup>2)</sup> Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия

<sup>\*)</sup> e-mail: tursunpulaturaboev24@gmail.com

В данной исследовательской работе методом молекулярной динамики (МД) теоретически оценивалась вероятность роста графена на поверхностях с низким индексом Ni(111) и высоким индексом Ni(331).

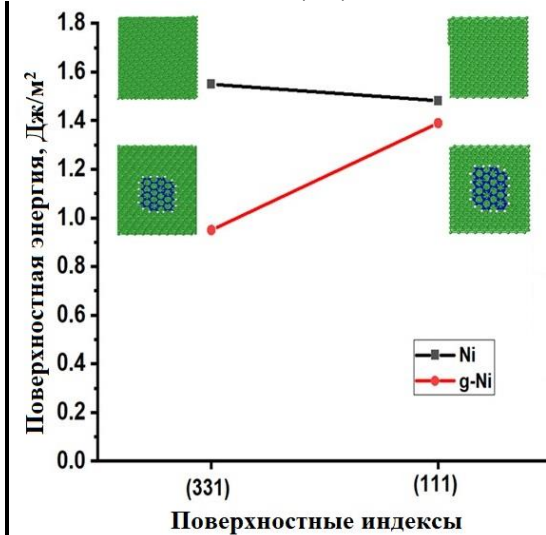


Рис. 1. Поверхностные энергии чистого кристалла никеля (черные квадраты) и никель с графеном (красные круги).

Основные результаты показали, что хотя чистый Ni(111) более стабилен, чем поверхность Ni(331), поверхностная энергия Ni(331) с графеном ниже (0,5 Дж/м<sup>2</sup>), чем у поверхности Ni(111) с графеном, которая считается наиболее традиционной поверхностью для выращивания графена. Это означает, что графен можно эффективно выращивать на поверхностях с высоким индексом Ni(331), аналогично традиционным поверхностям с низким индексом Ni(111).

## РОЛЬ ДЕФЕКТОВ ГРАФЕНА В ХРАНЕНИИ ВОДОРОДА

У.Б. Улжаев<sup>1\*)</sup>, И.Д. Ядгаров<sup>1)</sup>, У.Б. Халилов<sup>1,2)</sup><sup>1)</sup> Институт ионно-плазменных и лазерных технологий  
АН РУз. Ташкент, Узбекистан<sup>2)</sup> Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия

\*) e-mail: uub242526@gmail.com

Сегодня во многих исследованиях сообщается, что наноматериалы на основе углерода обладают возобновляемой емкостью хранения водорода, но способы увеличения их емкости хранения водорода остаются одной из насущных проблем [1]. В данном исследовании методом молекулярной динамики (МД) сравнивалась относительная масса (wt%) физосорбированного водорода в однослойных бездефектных и разноразмерных графенах (Рис.1).

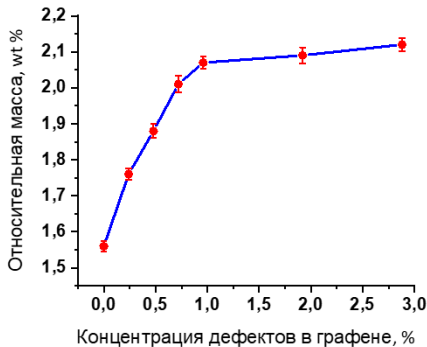


Рис. 1. Зависимость относительной массы молекул водорода от концентрации дефектов в графене.

Результаты показывают, что относительная масса молекул  $H_2$ , физосорбированных вокруг дефектного графена, в 1,36 раза больше, чем у бездефектного графена. Это исследование способствует пониманию на атомном уровне фундаментальных механизмов хранения водорода в графене с различными дефектами.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Rahul Krishna et.al. "Hydrogen Storage for Energy Application", 271, (2012)



## ИЗМЕНЕНИЕ СВОБОДНОЙ ЭНЕРГИИ В ПРОЦЕССЕ АГРЕГАЦИИ НАНОКЛАСТЕРОВ ОКСИДА НИКЕЛЯ

И.Г. Урунов<sup>1</sup>, Ф.М. Сафаров<sup>1</sup>, К.Б. Эгамбердиев<sup>1\*)</sup>,  
У.Б. Халилов<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт Ионно-Плазменных и Лазерных Технологий  
имени У.А. Арифова АН РУз, Ташкент, Узбекистан

<sup>2)</sup> Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия

\*) e-mail: kegamberdiev@yandex.ru

В настоящее время агрегация наночастиц с их уникальными свойствами представляет собой фундаментальный процесс в современной нанотехнологии и очень важна для роста кристаллов и формирования дисперсных коллоидов [1]. Следовательно, понимание процесса агрегации имеет технологическое, геохимическое и биологическое значение [2]. В данной работе было изучено поведение молярной свободной энергии Гиббса (МСЭГ) в процессе агрегации нанокластеров оксида никеля (NiO) при комнатной температуре с помощью компьютерного моделирования. На рис. 1 показано изменение МСЭГ нанокластеров NiO в вакууме и воде во времени.

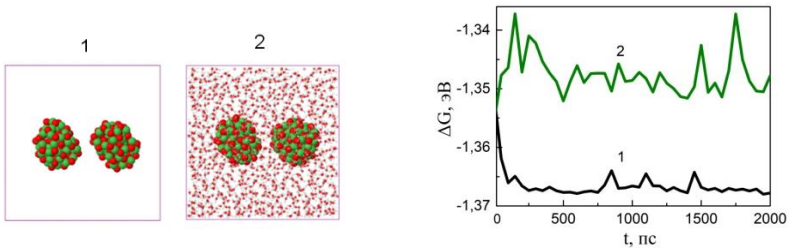


Рис.1 Изменение МСЭГ нанокластеров NiO в вакууме (1) и в воде (2)

Снижение устойчивости нанокластеров NiO в водной среде в результате образования гидродинамической оболочки оценивали по МСЭГ. В целом, это исследование помогает понять природу наноагрегации кластеров NiO диаметром около 1 нм на атомарном уровне и дает информацию экспериментаторам о размере нанокатализаторов и его контроле в процессе синтеза.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Jin R. et al. //Chemical reviews. – 2016. – Т. 116. – №. 18. – С. 10346-10413.
2. Lu Z., Yin Y. //Chemical Society Reviews. – 2012. – Т. 41. – №. 21. – С. 6874-6887.

## СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЕННОГО И ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МОДЕЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Ильясова Н.В.<sup>1</sup>, Кондракова О.В.<sup>2</sup>, Кудюкин А.И.<sup>3</sup>, Моос Е.Н.<sup>4</sup>, Орлов М.Ю.<sup>5</sup>

<sup>1)</sup> ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России, Рязань, Россия

<sup>2)</sup> ООО «Прайм-стоматология», ООО «Эстетика», Рязань, Россия

<sup>3,4)</sup> РГУ имени С.А. Есенина, Рязань, Россия

<sup>5)</sup> Центр одаренных детей "ГЕЛИОС", Рязань, Россия

e-mail: ilyasowa-natalya@mail.ru

Проблемы физического материаловедения биотканей и биоматериалов приобретают ключевую роль в современной медицинской отрасли. Существует проблема совместимости тканей живого организма с чужеродными материалами, например, при протезировании костей и суставов, фиксации брекет-систем. Данный аспект важен в связи с созданием многослойной структуры, основу которой представляет костное образование организма, связующее вещество и металл или керамика. В работе получены ранее не опубликованные результаты исследования плазменного и лазерного воздействия на примере модельных образцов, которые на данном этапе иллюстрированы для брекет-систем. В данной работе поверхность исследовалась на трёх брекет-системах одной компании производителя (3M Unitek) : металлические Victory Series™ , Mini Uni-Twin™ и керамические Clarity™ . Действие водородной плазмы на модельные образцы осуществлялось аппаратом «Мультиплаз-2500», где полностью ионизированная водородная плазма в качестве положительной компоненты содержит ионы водорода, а отрицательно заряженной компонентой являются электроны. А лазерное излучение при облучении образцов имело неизменную техническую характеристику длины волны - 10,6 мкм. Дальнейшее исследование участков поверхностей разрыва производилось с помощью метода атомно-силовой микроскопии (АСМ). У сканирующего зондового микроскопа есть опция анализ, которая позволила перевести шероховатость исследуемой поверхности в цифровую характеристику. Средняя шероховатость основания начального состояния поверхности металлического брекета Victory Series™ составила 118,1 нм, металлического брекета Mini Uni-Twin™ – 112,3 нм, керамического Clarity™- 64 нм. В итоге после плазменного и лазерного воздействия на поверхность основания брекетов средняя шероховатость превысила свои изначальные значения. Было доказано, что развитость шероховатости, полученная после воздействий на образцы, указывает на то, насколько прочным будет процесс сцепления в трехслойных композициях. Полученные в работе результаты могут принести пользу в практической медицине.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ильясова Н.В. и др. Сравнительный анализ поверхностей разрыва когезионных связей в многослойных системах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. Т. 15. №
2. Хубатхузин А. А. и др. Плазмохимическая обработка материалов // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – №. 15. – С. 88-92.
3. Proffit W., Fields H., Larson B., Sarver D. Contemporary orthodontics. 6th ed. Philadelphia, USA: Elsevier, 2018. 160 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФУЛЛЕРЕНА  $C_{20}$   
С ГРАФЕНОМ

Ш.Й. Аминов<sup>1)</sup>, А.С. Косимов<sup>1)</sup>, Х.И. Жабборов<sup>2)</sup>, И.Д. Ядгаров<sup>3\*)</sup>

<sup>1)</sup>Термезский государственный университет, Термез, Узбекистан

<sup>2)</sup>Ташкентский университет информационных технологий  
имени Мухаммада ал Хоразмий, Ташкент, Узбекистан

<sup>3)</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз.  
Ташкент, Узбекистан

\*e-mail: ishmuminyadgarov@gmail.com

Была построена компьютерная модель молекула фуллерена  $C_{20}$ . Затем строилась компьютерная модель «бесконечного» бездефектного графена, которая предназначена для рассмотрения вопроса адсорбции фуллерена  $C_{20}$  на графена. Рассмотрено три варианта адсорбции фуллерена на поверхности графена: а) посредством взаимодействия одного атома фуллерена и одного атома графена, б) посредством взаимодействия двух соседних атомов фуллерена и двух соседних атомов графена, в) посредством взаимодействия двух ближайших несоседних атомов фуллерена и двух ближайших несоседних атомов графена (см. рисунок 1.).

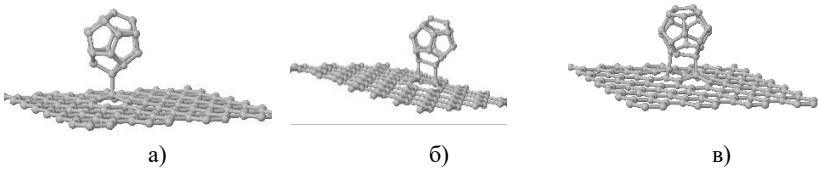


Рис. 1. Процессы адсорбции молекулы фуллерена  $C_{20}$  на нанографен.

Получены следующие энергии связывания и расстояния адсорбции для фуллеренов  $C_{20}$  адсорбированных на графене: а) 1,63эВ; 1,52Å, б) 1,07эВ; 1,58Å и в) 0,83эВ; 1,57Å. Таким образом, первому из трех вариантов адсорбции а) соответствуют наибольшая энергия связывания с графеном и наименьшее расстояние адсорбции.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМОВ БОРА С ДВУХСЛОЙНЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Ф.Ф. Умаров<sup>1)</sup>, Ш.А. Муминова<sup>2)</sup>, Д.В. Алябьев<sup>2)</sup>,  
И.Д. Ядгаров<sup>2\*)</sup>

<sup>1)</sup>Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан

<sup>2)</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент,  
Узбекистан

\*) e-mail: ishmuminyadgarov@gmail.com

В настоящей работе методом компьютерного моделирования с использованием пакета LAMMPS, (потенциал ReaxFF [1]) изучались процессы взаимодействия атомов бора (В) с двустенными углеродными нанотрубками (ДСУНТ). Внутренний и внешний диаметры ДСУНТ равны 0,678 и 1,357 нм соответственно (рис. 1), ДСУНТ выбраны на основе экспериментальных данных.

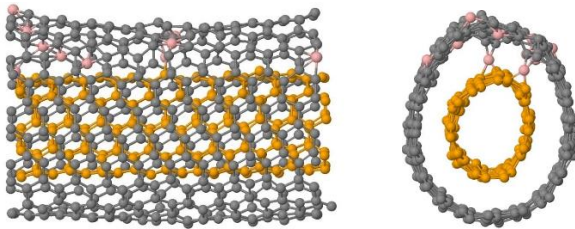


Рис. 1. Процессы адсорбции и инкапсуляции атомов бора ДСУНТ

Результаты показывают, что при падении на поверхность ДСУНТ атомов бора с энергиями от 0,3 эВ до 6 эВ, наблюдается их адсорбция поверхностью ДСУНТ. Определено, что длина связи В-С находится в диапазоне 1,4-1,8 Å. При рассеянии атомов бора с энергиями 6.5-7эВ происходит инкапсуляция атомов бора между слоями ДСУНТ.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. C. Zou, Y.K. Shin, A.C.T. van Duin, H. Fang, Z.-K. Liu, (2015), Acta Materialia 83.

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КАСКАДОВ  
СТОЛКНОВЕНИЙ В Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

А.И. Стручков<sup>1\*</sup>), Я.Г. Горне<sup>1)</sup>, К.В. Карабешкин<sup>1)</sup>, П.А. Карасев<sup>1)</sup>,  
А.И. Титов<sup>1)</sup>,

<sup>1)</sup> Политехнический ун-т Петра Великого, СПб, Россия

<sup>\*</sup>) e-mail: andrei.struchckov@yandex.ru

Ионная имплантация стоит в ряду важнейших технологий, используемых при изготовлении приборов полупроводниковой электроники. При этом любая ионная имплантация сопровождается накоплением радиационных повреждений. Для объяснения механизмов формирования таких повреждений зачастую важно знать параметры и геометрию каскадов столкновений, образующихся при проникновении иона в материал /1/.

В настоящей работе рассматривалось формирование каскадов столкновений в оксиде галлия при облучении ионами различных типов и энергий. Первичные данные о дефектах, составляющих каскады, были получены с помощью стандартного пакета SRIM. Расчет параметров каскадов столкновений осуществлялся по методике, описанной в /2/, которая учитывает тот факт, что геометрия каскадов столкновений может быть рассмотрена как имеющая фрактальную природу. Соответственно, была рассчитана фрактальная размерность каскадов для всех случаев облучения, наряду с плотностью каскадов.

Проанализирована зависимость фрактальной размерности от массы ионов. Проведено сравнение результатов фрактального анализа параметров каскадов с итогами метода, рассматривающего формирование перекрывающихся субкаскадов /1/.

Работа поддержана грантом РФФ № 22-19-00166.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. S.O. Kucheyev, et al. // J. Phys. D, 2009, **42**, 085309.
2. J. B. Wallace, et al. // Sci. Rep., 2017, **7**, 17574.

## ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ВТСП МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ $\text{Ba}^+$

А.Н. Ураков, А.У. Хужаниязова, Ж.Б. Хужаниязов, М.Б. Юсупжанова,  
Д.А. Ташмухамедова  
Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан,  
e-mail: ftmet@mail.ru

В работе впервые приводятся экспериментальные данные по влиянию низкоэнергетической имплантации ионов  $\text{Ba}^+$  на состав керамики  $\text{CuOY}_2\text{O}_3\text{BaO}$ . Имплантация проводилась ионами  $\text{Ba}^+$  с энергиями от 0.5 до 5 keV при дозе насыщения  $D = D_{\text{sat.}} = (6-8) \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ . Источником бария служили таблетки титаната бария ( $\text{BaTi}$ ). Основные исследования проводились при  $E_0 = 1 \text{ keV}$ .

В таблице приведена примерная атомная концентрация различных элементов на поверхности  $\text{CuOY}_2\text{O}_3\text{BaO}$  до и после имплантации ионов  $\text{Ba}^+$  с  $E_0 = 0.5 \text{ keV}$  и  $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ . Из таблицы видно, что ионная имплантация приводит к перераспределению атомов ВТСП материалов в приповерхностной области. После ионной имплантации концентрация Ba увеличивается в 3 раза, а концентрация других компонент ВТСП уменьшается 1.5 – 1.6 раза.

Материал	C, at.% $\Delta C = \pm 5\%$			
	Cu	O	Y	Ba
$\text{CuOY}_2\text{O}_3\text{BaO}$	12	50	25	13
$\text{Ba}^+ \rightarrow \text{CuOY}_2\text{O}_3\text{BaO}$	8	35	17	40
Таблица. Концентрация атомов различных элементов на поверхности ВТСП				

Таким образом, в работе показано, что при имплантации ионов  $\text{Ba}^+$  с  $E_0 = 0.5 \text{ keV}$  в приповерхностной области  $\text{CuOY}_2\text{O}_3\text{BaO}$  образуется тонкий слой ( $\sim 40-50 \text{ \AA}$ ) обогащенный барием. Установлено, что после ионной имплантации сверхпроводящие свойства в ионно-имплантированном слое ( $d = 50-60 \text{ \AA}$ ) теряются, а при  $d \geq 60-70 \text{ \AA}$  – сохраняются. Впервые определен примерный состав поверхности ионно-имплантированного ВТСП  $\text{CuO}_{0.5}\text{Y}_{0.5}\text{OBa}_3\text{O}_2$ .

## РОЛЬ КЛАСТЕРА НИКЕЛЯ В ЭФФЕКТИВНОМ ХРАНЕНИИ ВОДОРОДА УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

У.Б. Улжаев<sup>1\*)</sup>, К.К. Мехмонов<sup>1)</sup>, И.Д. Ядгаров<sup>1)</sup>,  
М.С. Юсупов<sup>1,2)</sup>, У.Б. Халилов<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup> Институт ионно-плазменных и лазерных технологий  
АН РУз. Ташкент, Узбекистан

<sup>2)</sup> Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия

\*) e-mail: uub242526@gmail.com

В этом исследовании реактивная молекулярная динамика (МД) использовалась для изучения хранения водорода в однослойных углеродных нанотрубках (ОСУНТ) с эндодральными атомами/кластером никеля. [1].

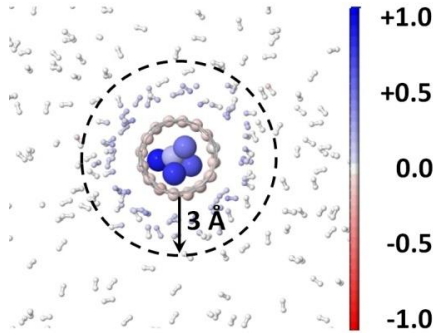


Рис. 1. Расположение молекул  $H_2$  вокруг  $Ni_4@OУНТ$ .

Результаты показали, что внедрение атомов никеля внутрь ОУНТ изменяет парциальные заряды атомов в системе. Следовательно, увеличение объемной доли атомов никеля приводит к увеличению концентрации физсорбированных молекул водорода вокруг ОУНТ примерно в 1,8 раз.

### ЛИТЕРАТУРА

1. U. Khalilov et al., How the Alignment of Adsorbed Ortho H Pairs Determines the Onset of Selective Carbon Nanotube Etching, *Nanoscale* 9, 1653 (2017)

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АДСОРБЦИИ МОЛЕКУЛЫ ФУЛЛЕРЕНА C<sub>60</sub> НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ

Ф.Ф. Умаров<sup>1)</sup>, И.З. Уролов<sup>2)</sup>, Д.В. Алябьев<sup>2)</sup>, И.Д. Ядгаров<sup>2\*)</sup>

<sup>1)</sup>Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан

<sup>2)</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз. Ташкент,  
Узбекистан

\*) e-mail: ishmuminyadgarov@gmail.com

В данной работе методом компьютерного моделирования с использованием пакета LAMMPS изучались процессы адсорбции молекулы фуллерена C<sub>60</sub> на реконструированной поверхности Si(100). В работе был использован потенциал Терсоффа [1]. На рис. 1 показано адсорбционное состояние молекулы C<sub>60</sub> на реконструированной поверхности кремния.

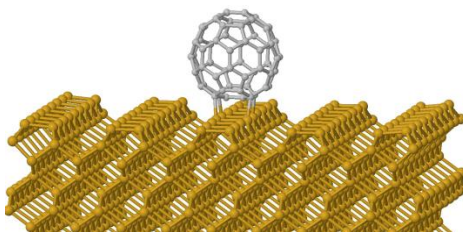


Рис. 1. Процесс адсорбции молекулы фуллерена C<sub>60</sub> на реконструированной поверхности кремния

Согласно полученным результатам, энергия адсорбции C<sub>60</sub> на поверхности Si(100) и длина связей Si-C зависят от конфигурации молекулы C<sub>60</sub> на поверхности и места на поверхности, где она адсорбируется.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. P. Erhart and K. Albe, Physical Review B, 71, 035211-1-14, (2005)



МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛЕВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ  
ИЗ КАТОДА С ТОНКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЁНКОЙ НА ЕГО  
РАСПЫЛЕНИЕ В ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ В СМЕСИ АРГОНА И ПАРОВ  
РТУТИ

Г.Г. Бондаренко<sup>1)</sup>, Д.О. Савичкин<sup>2)</sup>, М.Р. Фишер<sup>3)</sup>, В.И. Кристя<sup>3,\*)</sup>

<sup>1)</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Москва, Россия

<sup>2)</sup> ЗАО «Топ Системы», Москва, Россия

<sup>3)</sup> Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Калуга, Россия

\*) e-mail: kristya@bmstu.ru

Одним из типов газоразрядных приборов являются ртутные осветительные лампы, в которых в качестве рабочего газа используется смесь аргона с фиксированной концентрацией и паров ртути, концентрация которых зависит от температуры. Для уменьшения напряжения зажигания разряда на поверхности их электродов часто формируют тонкие диэлектрические пленки. В разряде на поверхности пленки на электроде, выполняющем функции катода, накапливаются положительные заряды, что обуславливает возникновение в ней электрического поля, достаточного для появления полевой эмиссии электронов из металлической подложки катода в пленку. Это может приводить к увеличению эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода и к снижению напряжения зажигания разряда. Ранее процессы переноса основных типов частиц и их вклады в распыление катода изучались лишь для разрядов в смесях инертных газов, состав которых не зависит от температуры, или в смеси аргон-ртуть с металлическим катодом.

В данной работе формулирована модель разряда в смеси аргона и паров ртути при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки. Рассчитаны зависимости характеристик разряда от температуры и показано, что разряд возникает при меньшем напряжении между электродами, чем в случае катода без пленки. Это обуславливает снижение энергии бомбардирующих поверхность катода ионов и атомов и уменьшение интенсивности его распыления в разряде.

## РАЗРУШЕНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ ПОД ТЕПЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИОННОГО ПОТОКА

А.И. Кудюкин

Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина, 390000 Рязань,  
ул. Свободы 46, Россия

E- mail: a.kudykin@365.rsu.edu.ru

Деградацию поверхности электродов под тепловым воздействием ионного потока можно разделить на две большие группы:

- 1) разрушение мелких дефектов (царапин, вкраплений и т.д.);
- 2) крупномасштабное плавление поверхностных участков (перемещение основных элементов в ходе плавления и испарения).

На основе применения методов атомно-силовой микроскопии для анализа топографии полированной поверхности стеклокерамики обнаружено существование, по крайней мере, трех типов рельефа (рис. 1). В зависимости от особенностей воздействия на поверхность авторами работы были названы изотропным (а), зернистым (б) и анизотропным (в).

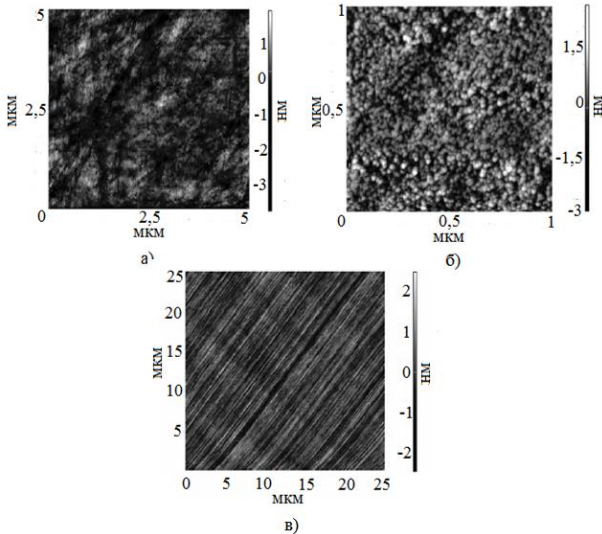


Рис.1. Изображения поверхности ситалловых подложек, полученные с помощью АСМ: а – изотропный, б – зернистый и в – анизотропный

Проведя статистический анализ каждого их типов дефектов, можно определить, к какому роду деградации относится разрушение поверхности электродов в высоковольтных дугогасительных камерах.

## РАСПЫЛЕНИЕ КРЕМНИЯ ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ АТОМАРНЫМИ И МОЛЕКУЛЯРНЫМИ ИОНАМИ

Ш.Дж. Ахунов, Д.Т. Усманов, С.С. Исхакова, Ш.М. Ахмедов,  
А.Ш. Раджабов, П.Г. Кахрамонова, Т.Х. Эрова  
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент,  
Узбекистан, e-mail: a.shovkatjon@mail.ru

Исследования кристаллических полупроводников не теряют свою актуальность, несмотря на свою детальную изученность. Современную электронику невозможно представлять без них. Исследование распыления кремния в виде кластеров при бомбардировке кластерными ионами вызывает интерес. Интересно выяснить насколько закономерности, полученные ранее в условиях существования плотных нелинейных каскадов и тепловых пиков, будут иметь место в случае полупроводниковых мишеней. Как будет влиять атомарная и молекулярная бомбардировка на выход вторичных многоатомных ионов при увеличении количества составляющих их атомов.

В данной работе исследована зависимость выхода распыленных нейтральных молекул кремния Si от заряда, энергии и количества бомбардирующих частиц в диапазоне энергий 1– 10 кэВ.

Наблюдается рост выхода распыленных молекул кремния с ростом заряда и энергии бомбардирующих частиц, опережающий рост интегрального коэффициента распыления. Рост выхода нейтральных молекул кремния менее выражен по сравнению с ростом выхода положительных ионов ряда элементов и соединений наблюдаемым при бомбардировке молекулярными ионами ряда металлов. По-видимому, значительный рост выхода вторичных положительных ионов связан с увеличением степени ионизации вторичных частиц, а в случае распыления нейтральных молекул, приращение выхода может быть связано с другими механизмами, например с увеличением десорбции нейтральных молекул с увеличением количества молекул в бомбардирующем ионе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. Н. Морозов «Вторичная ионная эмиссия при бомбардировке кремния многозарядными ионами  $Si^{q+}$ » //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2012, № 8, с. 1–4.

РАСПЫЛЕНИЕ МОЛЕКУЛ ФТАЛОЦИАНИНА МЕДИ НА GaAs  
ПОДЛОЖКЕ ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ МНОГОЗАРЯДНЫМИ ИОНАМИ

П.Г. Кахрамонова, Д.Т. Усманов, Ш.М. Ахмедов, А.Ш. Раджабов,  
Ш.Дж. Ахунов, С.С. Исакова, Т.Х. Эрова.  
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз,  
Ташкент, Узбекистан,  
e-mail: a.shovkatjon@mail.ru

Исследование кристаллических полупроводников не теряют свою актуальность, несмотря на свою детальную изученность. Современную электронику невозможно представлять без них. Исследование распыления кремния в виде кластеров при бомбардировке кластерными ионами вызывает интерес. Интересно выяснить насколько закономерности, полученные ранее в условиях существования плотных нелинейных каскадов и тепловых пиков, будут иметь место в случае полупроводниковых мишеней. Как будет влиять атомарная и молекулярная бомбардировка на выход вторичных многоатомных ионов при увеличении количества составляющих их атомов.

В данной работе исследована зависимость выхода распыленных нейтральных молекул кремния Si от заряда, энергии и количества бомбардирующих частиц в диапазоне энергий 1– 10 кэВ.

Наблюдается рост выхода распыленных молекул кремния с ростом заряда и энергии бомбардирующих частиц, опережающий рост интегрального коэффициента распыления. Рост выхода нейтральных молекул кремния менее выражен по сравнению с ростом выхода положительных ионов ряда элементов и соединений наблюдаемым при бомбардировке молекулярными ионами ряда металлов. По-видимому, значительный рост выхода вторичных положительных ионов связан с увеличением степени ионизации вторичных частиц, а в случае распыления нейтральных молекул, приращение выхода может быть связано с другими механизмами, например с увеличением десорбции нейтральных молекул с увеличением количества молекул в бомбардирующем ионе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Н. Морозов «Вторичная ионная эмиссия при бомбардировке кремния многозарядными ионами  $Si^{q+}$ » поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2012, № 8, с. 1–4.

ВЫСОКОДОЗНАЯ ИОННО-ЛУЧЕВАЯ ЭРОЗИЯ  
УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ВОЛЬФРАМА

Р.Х. Хисамов<sup>1)</sup>, Н.Н. Андрианова<sup>2,3)</sup>, А.М. Борисов<sup>2,3,4)</sup>,  
М.А. Овчинников<sup>2)</sup>, И.И. Мусабилов<sup>1)</sup>, Р.Р. Тимиряев<sup>1)</sup>,  
Р.Р. Мулюков<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> ИПСМ РАН, Уфа, Россия

<sup>2)</sup> НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

<sup>3)</sup> МАИ (НИУ), Москва, Россия

<sup>4)</sup> МГТУ Станкин, Москва, Россия

Представлены результаты воздействия высокодозного облучения ионами  $\text{Ag}^+$  с энергией 30 кэВ на морфологию поверхности ультрамелкозернистого (УМЗ) вольфрама (99.93%). УМЗ образцы с размером зерен 100-200 нм получены деформационным наноструктурированием методом кручения под высоким давлением при 6 ГПа [1]. Облучение проведено ионами  $\text{Ag}^+$  по нормали к поверхности образца с флюенсом  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  на масс-монохроматоре НИИЯФ МГУ [2]. Образец при облучении нагревается до температуры не выше 50°C. В результате облучения на поверхности УМЗ вольфрама сформировался конусообразный рельеф с углом раствора конусов около 13°. Определена термическая стабильность конусообразного рельефа на поверхности и зеренной структуры в объеме УМЗ вольфрама при отжиге от 1000 до 1400°C в течение 1 часа в вакууме. Оценено влияние деформационного наноструктурирования на скорость ионно-лучевой эрозии вольфрама.

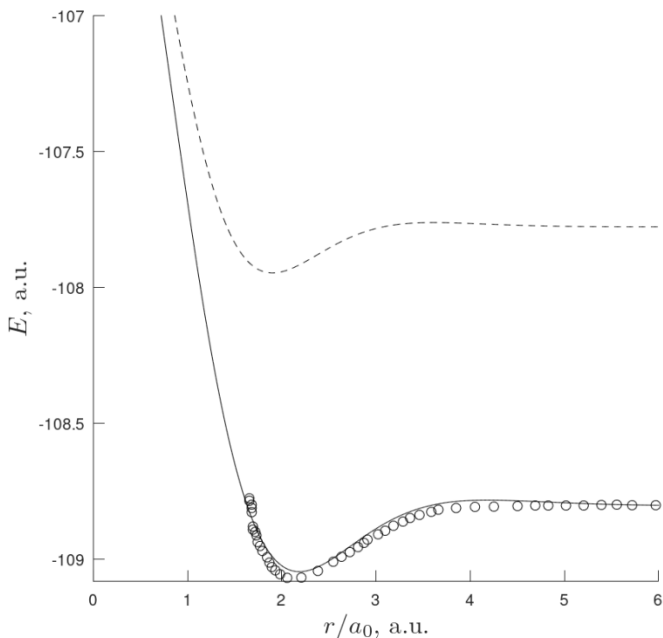
ЛИТЕРАТУРА

1. R.R. Mulyukov. Influence of nanocrystalline structure on work function of tungsten. JVST B. 2006, 24(2). P. 1061–1066.
2. E.S. Mashkova, V.A. Molchanov. Medium-Energy Ion Reflection from Solids. Amsterdam: North-Holland. 1985. 444 p.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛНОЙ ЭНЕРГИИ МОЛЕКУЛЫ  
АЗОТАВ.П. Кошчев<sup>1,\*</sup>, Ю.Н. Штанов<sup>2</sup><sup>1</sup>НИУ МАИ, филиал «Стрела», г. Жуковский, Моск. обл.<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «ТИУ», филиал ТИУ в г. Сургуте, г. Сургут

\*) e-mail: koshcheev1@yandex.ru

На рисунке представлены результаты сравнения расчетов [1] (кружки) и полной энергии молекулы азота [2] для состояния  $N(4s)+N(4s)$  (сплошная линия) и состояния  $N(3p)+N(3p)$  (пунктирная линия).



## ЛИТЕРАТУРА

1. Lie G. C., Clementi E. // J. Chem. Phys., 1974, V. 60, P. 1288. DOI: 10.1063/1.1681193
2. Koshcheev V.P., Shtanov Yu.N. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech., 2023, V. 17, N. 1, P. 266-270. DOI: 10.1134/S1027451023010317

## ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУР, СОЗДАНЫХ НА ОСНОВЕ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Б.Е. Умирзаков<sup>\*)</sup>, И.Р. Бекпулатов, И.Х. Турапов  
Ташкентский государственный технический университет,  
Университетская 2, 100095, Ташкент, Узбекистан  
<sup>\*)</sup> e-mail: be.umirzakov@gmail.com

Получение наноразмерных структур и слоев на поверхности и в приповерхностной области двухкомпонентных материалов, комплексное исследование их состава, фазовой структуры, электронного состояния, изучение механизмов наблюдаемых явлений, разработка практических рекомендаций по применению обнаруженных эффектов в новых приборах твердотельной электроники.

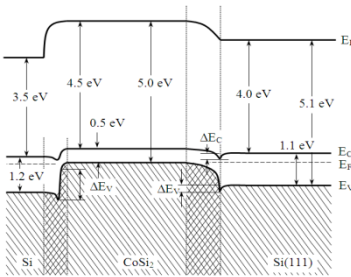


Рис.1. Энергетическая зонная диаграмма для системы Si/CoSi<sub>2</sub>/Si(111).

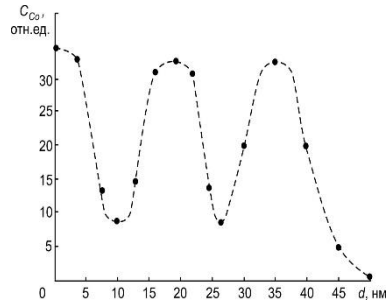


Рис.2. Концентрационные профили распределения Co по глубине для Si, имплантированного ионами Co<sup>+</sup> с E<sub>0</sub> = 30; 15 и 1 кэВ.

Определены оптимальные условия ионной имплантации (энергия, доза) и последующего отжига (температура и время) для получения многослойной системы CoSi<sub>2</sub>/Si/CoSi<sub>2</sub>/Si и SiO<sub>2</sub>/Si/CoSi<sub>2</sub>/Si. Изучена их электронная структура, эмиссионные и оптические свойства.

Впервые получены наноразмерные фазы CoSi<sub>2</sub> в 2 и 3 слоя в приповерхностной области Si. Установлено, что E<sub>g</sub> нанофаз CoSi<sub>2</sub> толщиной 8–10 нм, созданных на глубине 28–30 нм, составляет 0,85 эВ, а степень покрытия - 0,25–0,3. При создании второго слоя таких же нанофаз значение E<sub>g</sub> этой системы, практически, не меняется, а степень покрытия увеличивается в 1,5–2 раза.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК  $Mn_4Si_7$ ,  
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

М.Т. Нормурадов<sup>1</sup>, К.Т. Довранов<sup>1</sup>, И.Р. Бекпулатов<sup>2,\*</sup>, Д.А. Нормуродов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Каршинский государственный университет, г. Карши, Узбекистан

<sup>2</sup> Ташкентский государственный технический университет,

г. Ташкент, Узбекистан,

\* E-mail: bekpulatov85@rambler.ru

Пленки  $Mn_4Si_7/Si(111)$  выращивались методом ионно-плазменного распыления с использованием ионов аргона. Изучались их электропроводность и электрическое сопротивление в зависимости от температуры, а также проводилось соотношение тонких пленок ВСМ.

Сопротивление пленки ВСМ, выращенной на поверхности полупроводникового кремния  $p$ - типа, имеет нелинейный характер на графике зависимости от температуры, а это означает, что она, по своей природе, является полуметаллической. Электропроводность пленки  $Mn_4Si_7/Si(111)$  толщиной 102,3 нм, измеренная при комнатной температуре, имеет значение  $1078,5 \Omega^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , а электрическое сопротивление -  $111,5 \Omega$ .

Тонкие нанометровые слои  $Mn_4Si_7/Si(111)$ , выращенные ионно-плазменным методом, также формировались на различных кремниевых подложках при разных температурах роста. Были проанализированы электропроводность, коэффициент мощности и электрическое сопротивление полученных слоев  $Mn_4Si_7/Si(111)$  различной толщины в интервале температур 300 - 600 К. Наибольшее значение коэффициента мощности составляет 1580,5  $\mu\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}^2$  при 500 К. Оптимальной температурой для тонких пленок  $Mn_4Si_7/Si(111)$  является 800 К. Полученные результаты показывают, что электрическая проводимость увеличивается с уменьшением толщины пленок на поверхности кремния. Этот факт можно использовать для повышения чувствительности ИК - приемников.



О СДВИГЕ МАКСИМУМА ПОЛЯРНОГО УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
РАСПЫЛЕННЫХ АТОМОВ В  
МД-МОДЕЛИ РАСПЫЛЕНИЯ ГРАНИ (001) Ni

А.И. Мусин<sup>1)</sup>, В.Н. Самойлов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Московский государственный областной педагогический университет,  
Москва, Россия

<sup>2)</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В настоящей работе исследованы полярные угловые распределения атомов, распыленных с грани (001) Ni ионами Ag с энергией 200 эВ при 300 К. Расчеты выполнялись с помощью метода молекулярной динамики по модели /1/. Было рассчитано падение  $\sim 10^6$  ионов.

При энергии  $2.5 \pm 0.5$  эВ максимум полярного углового распределения наблюдался при угле  $53^\circ$ . С ростом энергии распыленных атомов максимум смещался в направлении к нормали к поверхности до  $\sim 43^\circ$  при энергии  $9.0 \pm 1.0$  эВ, затем – в сторону от нормали. При энергии  $25 \pm 5$  эВ он наблюдался при угле  $46^\circ$ . Был сделан вывод, что сдвиг максимума имеет немонотонный характер. Такой сдвиг наблюдался экспериментально /2/, в МД-расчетах с энергией ионов 1000 эВ /3/ и в нашей модели, в рамках которой рассчитывалась динамика 21 атома верхнего слоя только на стадии эмиссии атома с поверхности.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысоко-производительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова /4/.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Kornich G.V., Betz G. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B., 1998, V. 143, No. 4, p. 455-472.
2. van Veen A. Ph.D. Thesis, Univ. Utrecht, Utrecht, the Netherlands, 1979.
3. Samoilov V.N., Tatur A.E. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B., 1999, V. 153, No. 1-4, p. 319-325.
4. Vl. Voevodin et al. // Supercomp. Front. Innov., 2019, V. 6, No. 2, p. 4-11.

## ПРОЯВЛЕНИЕ ГЕКСАТИЧЕСКОЙ ФАЗЫ В ДВУМЕРНЫХ СИСТЕМАХ С ЦИРКУЛЯРНОЙ СИММЕТРИЕЙ

Э. Г. Никонов<sup>\*)</sup>, Р.Г. Назмитдинов, П.И. Глуховцев  
Объединённый институт ядерных исследований,  
г. Дубна, РФ  
<sup>\*)</sup> e.nikonov@jinr.ru

Квазидвумерные системы играют важную роль при создании различных устройств для нужд нанoeлектроники.

В частности, латеральные квантовые точки, в которых взаимодействующие электроны заперты эффективным центрально-симметричным потенциалом, являются актуальным объектом экспериментальных и теоретических исследований /1/. Очевидно, что функциональная эффективность таких систем зависит от их структурных свойств. Возникает как практический, так и фундаментальный вопрос о критическом числе электронов, при котором начнет происходить нарушение симметрии кристаллической решетки в рассматриваемой системе и, как следствие, зарождение дефектов. До сих пор в системах с конечным числом частиц внимание исследователей было сосредоточено на поиске сигналов фазовых переходов таких, как, например, зарождение новой гексатической фазы. Переход к этой фазе сопровождается появлением дефектов в вигнеровской кристаллической фазе при некоторой температуре /2/. В работе исследованы зависимости ориентационного параметра порядка и конфигурационной энтропии от полного числа частиц и фазовой структуры системы /3/ для  $N > 200$  при нулевой температуре.

## ЛИТЕРАТУРА

1. J. L. Birman, R. G. Nazmitdinov, V.I. Yukalov // Phys. Rep. 526, 1 (2013).
2. В. Н. Рыжов, Е. Е. Тареева, Ю. Д. Фомин, Е. Н. Циок // УФН 187, 921–951 (2017).
3. R. G. Nazmitdinov, A. Puente, M. Cerkaski, M. Pons // Phys. Rev. E 95, 042603 (2017).

THERMOELECTRIC PERFORMANCE OF Fe<sub>2</sub>VAl/CNT-BASED ALLOYSEmad M. Elsehly<sup>1\*)</sup>, N.G. Chechenin<sup>2)</sup><sup>1)</sup> Damanhour University, Egypt<sup>2)</sup> SINP MSU, Russia

\*) elsehlyfigo@yahoo.com

Heusler-type Fe<sub>2</sub>V<sub>x</sub>Ti<sub>1-x</sub>Al alloys offer an alternative solution for the generation of thermoelectric power near room temperature. In the current research, thermoelectric properties of the p-type Fe<sub>2</sub>V<sub>0.9</sub>Ti<sub>0.1</sub>Al and Fe<sub>2</sub>V<sub>0.9</sub>Ti<sub>0.1</sub>Al/CNTs alloys, prepared by SPS, were studied. Carbon nanotubes (CNTs) were used as dopants to improve the Seebeck coefficient and electrical conductivity [1]. Upon doping with CNTs, the thermal conductivity was significantly reduced, meanwhile, the value of the power factor increased from 0.45 to 1.55 mW/m.K<sup>2</sup> at around 330K. The effect of CNT inclusions on the thermoelectric parameters of Fe<sub>2</sub>V<sub>0.9</sub>Ti<sub>0.1</sub>Al compounds was systematically studied. When compared to Fe<sub>2</sub>V<sub>0.9</sub>Ti<sub>0.1</sub>Al, which had a figure of merit of just 0.02 at 330 K, the CNT-containing samples showed a significantly improved figure of merit up to 0.07. we offer a novel technique to improve the performance of Fe<sub>2</sub>VAl alloys.

## REFERENCES

1. E.M. Elsehly, E.M.M. Ibrahim, Medhat A. El-Hadek, A. El-Khouly, V. Khovaylo, Z.M. Elqahtani, N.G. Chechenin, A.M. Adam, Annealing effect on the thermoelectric properties of multiwall carbon nanotubes, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, (2023), **146**,115566

ВОЗДЕЙСТВИЕ КИСЛОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ  
СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С УГЛЕРОДНЫМИ  
НАНОТРУБКАМИ В ДИАПАЗОНЕ (0,25 – 25) МКМ

Л.А. Власукова <sup>1)</sup>\*, В.Н. Черник<sup>2)</sup>, И.Д. Парфимович<sup>1)</sup>,  
Ф.Ф. Комаров<sup>1)</sup>, И.Н. Пархоменко<sup>1)</sup>, Л.С. Новиков<sup>2)</sup>,  
БГУ<sup>1)</sup>, Минск, Беларусь<sup>1)</sup>, НИИЯФ МГУ<sup>2)</sup>, Москва, Россия  
\*) e-mail: komarovf@bsu.by, vlachernik@yandex.ru

Композитные материалы на основе полимеров произвели революцию в космической отрасли благодаря своим многофункциональным, разнонаправленным и адаптируемым свойствам, которые позволяют им выдерживать экстремальные условия космического пространства. К перспективным новым типам функциональных материалов относятся композиты, модифицированные углеродными наноструктурами. Добавление углеродного наполнителя в полимерную матрицу приводит к улучшению ее электропроводности, увеличению поглощательной способности в широком спектральном диапазоне. Не удивительно, что данные материалы нашли свое применение и в космосе. Полимерные композиты широко используются в конструкциях космических кораблей, элементах полезной нагрузки, силовых и тепловых подсистемах управления, элементах оптических систем.

Предыдущие исследования продемонстрировали перспективность применения композитных материалов, облученных атомарным кислородом, в качестве антиотражающих покрытий для ближнего ИК-диапазона. Настоящий доклад является продолжением работы по созданию функциональных материалов для космических приложений, и расширяет диапазон изучения оптических свойств композитов с УНТ до среднего ИК диапазона.

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОТОКОВ КИСЛОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ПОЛИМЕРНЫЕ ПЛЕНКИ С ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

В.Н. Черник, Л.С. Новиков  
НИИЯФ МГУ, Москва, Россия  
vlachernik@yandex.ru

Полимерные пленки широко используются в современной космической технике, где они подвергаются воздействию различных факторов космической среды. При орбитальном полете на низких околоземных орбитах одним из основных разрушающих полимеров воздействием признается атомарный кислород набегающего потока. Под его действием происходит распыление материала и ухудшение многих функциональных характеристик. Для защиты полимерных материалов, расположенных на поверхности космического аппарата, применяют различные методы защиты, в том числе инертные к атомарному кислороду тонкопленочные покрытия. Для исследования стойкости покрытий проводят наземные лабораторные ускоренные испытания в потоках кислородной плазмы.

В данной работе исследуются полиимидные пленки марки ПМ с тонкопленочными покрытиями следующих типов: фторопласт-4, оксиды индия и кремния толщиной 1 и 3 нм. Измерены значения удельных потерь массы для различных флюенсов атомарного кислорода при облучении ускоренными потоками кислородной плазмы. Потери массы у защищенных пленок уменьшаются более чем на порядок величины при малых флюенсах до  $(2-4) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ . При дальнейшем увеличении флюенса атомарного кислорода наблюдается падение защитного действия покрытий вследствие их распыления. На графике зависимости массы от флюенса это проявляется в изломе кривой, который для более толстых покрытий наблюдается при больших флюенсах. В докладе описывается методика ускоренных испытаний, приводятся результаты экспериментов. Обсуждаются полученные экспериментальные данные по эрозии поверхности материалов и деградации их определяющих свойств

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНОВ C<sub>60</sub> С ПОВЕРХНОСТЬЮ Si В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ 10-15 КЭВ

В.Е. Пуха<sup>1\*</sup>), П.А. Карасёв<sup>2)</sup>, А.А. Бельмесов<sup>1)</sup>, Е.Н. Кабачков<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черноголовка Россия

<sup>2)</sup> Политехнический университет Петра Великого, С.-Петербург

<sup>\*</sup>) e-mail: pve@icp.ac.ru

При облучении мишеней ионами C<sub>60</sub> с энергии ~10<sup>4</sup> эВ наблюдается переход от роста углеродных пленок к эрозии мишени. Значение энергии ионов, соответствующее переходу от осаждения углеродной пленки к эрозии мишени зависит от энергии связи вещества мишени, ее температуры /1/, дозы ионов и состава остаточной атмосферы /2/.

Исследования проводились в вакууме не хуже 5·10<sup>-6</sup> Па. Использование гетероионного насоса позволило убрать активные газы из остаточной атмосферы. Для облучения мишени использован ионный источник с седловидным полем. Пары C<sub>60</sub> из двух эффузионных ячеек направлялись в анодную область источника. Ускоряющее напряжение варьировалось от 6 до 8 кВ. Пучок ионов проходил через масс-спектрометр и направлялся на мишень (Si). Облучение ионами C<sub>60</sub><sup>++</sup> производилось при температуре мишени 20, 100 и 300°C дозой 10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup>. Поверхность исследовалась методами РФЭС и АСМ.

При температурах 20 и 100°C и энергии ионов 10-15 кэВ идет эрозия мишени. Коэффициент распыления при увеличении энергии ионов от 10 до 15 кэВ растет от 30 до 60 атомов кремния на один ион C<sub>60</sub>. На поверхности мишени после эрозии обнаружены фазы SiC. Увеличение температуры до 300°C приводит к прекращению распыления и росту углеродной пленки на поверхности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. V.E. Pukha, et al.// Proceedings of the YETI 2020, St. Petersburg, Russia. Springer International Publishing, 2021, p. 131
2. G. Gillen, et al.//Applied surface science (2006), 252, 6521.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ТЕРМОСТАТА ПРИ  
МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ СВОБОДНЫХ  
ФУЛЛЕРЕНОВ

Д.В. Алябьев, И.Д. Ядгаров  
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий  
Ташкент, Узбекистан  
e-mail: wside2008@mail.ru

К настоящему времени интерес к эндодральным фуллеренам сохраняет высокий уровень. Это, прежде всего, связано с развитием методов синтеза и выделения эндодральных фуллеренов [1]. Для моделирования идеализированных процессов, рассмотренных в [1], необходимо корректно оценивать время динамической стабилизации модельного процесса, микро- и макроскопических параметров. Получены результаты оценки времени термализации для процесса теплового движения свободных фуллеренов в широком диапазоне температур (1000 фуллеренов, 610-900К, термостат Нозе-Хувера, пакет LAMMPS,[2]). Статистический анализ показал, что для рассматриваемого модельного эксперимента, минимально требуемое время для корректного описания термодинамики процесса составляет не менее 10пс.

Общее время процесса модельного эксперимента составило 100пс, для этого времени, отклонение температуры от заданного ее значения на уровне  $2\sigma$  составляет не более 6К (для температуры системы 900К), и не более 4К (для температуры системы 610К). Статистический анализ выполнен с применением стандартного функционала языка R.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. AIP Advances 9, 075324 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5100980>
3. LAMMPS.org
4. R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <https://www.R-project.org/>

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ АРГОНА С ПОВЕРХНОСТЬЮ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ

Е.А. Скрялева<sup>1\*)</sup>, Б.Р. Сенатулин<sup>1)</sup>, Д.А. Киселев<sup>1)</sup>, Т.С. Ильина<sup>1)</sup>,  
А.Е. Иешкин<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСИС», Москва, Россия

<sup>2)</sup> Физический факультет, Московский Государственный Университет  
имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*) e-mail: easkryleva@gmail.com

Эксперименты по облучению кристаллов ниобата лития пучками кластерных ионов  $Ar_{2500}^+$ , ускоренных до энергий 10 и 20 кэВ, проведены в рентгеновском фотоэлектронном спектрометре PHI5000 VersaProbeII (ULVAC-PHI), оснащенном источником кластерных ионов аргона (ULVAC). Методом АСМ обнаружено, что облучение под углом  $55^\circ$  от нормали к поверхности кристалла приводит к развитию волнообразного рельефа (рипплам) /1, 2/. Показано, что размеры рипплов увеличиваются при увеличении энергии пучков и дозы облучения, достигая 350 нм по высоте и 1.4 мкм по длине волны. В условиях нормального падения рельеф не образуется, напротив, наблюдается эффект уменьшения шероховатости, что позволило определить скорости распыления  $LiNbO_3$ . Методом РФЭС исследованы изменения химического состава, индуцированные кластерными ионами, и выявлены оптимальные режимы распыления для проведения послойного анализа, исключая влияние облучения на истинный состав поверхности.

Работа выполнена в рамках проекта FSME-2020-0031 (0718-2020-0031).

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. E.A. Skryleva, B.R. Senatulin, D.A. Kiselev, T.S. Ilina, D.A. Podgorny, Yu.N. Parkhomenko, *Surfaces and Interfaces*, 2021, 26, 101428
2. A.E. Ieshkin, T.S. Ilina, D.A. Kiselev, B.R. Senatulin, E.A. Skryleva, G. Suchaneck, Yu.N. Parkhomenko, *Physics of the Solid State*, 2022, 64, 10, 1465



**Секция III**

**ОРИЕНТАЦИОННЫЕ И РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭФФЕКТЫ,  
ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, ИЗМЕНЕНИЕ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ  
ЧАСТИЦ**



## ГИБРИДНАЯ СХЕМА ПОЗИТРОННОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ СИБИРСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ИСТОЧНИКА ФОТОНОВ (СКИФ)

С.В. Абдрашитов<sup>1,\*</sup>, О.В. Богданов<sup>1,2)</sup>, С.Б. Дабагов<sup>3,4,5)</sup>, А.М. Лидер<sup>2)</sup>, Т.А.  
Тухфатуллин<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2)</sup> Томский политехнический университет, Томск, Россия

<sup>3)</sup> INFN-LNF, Фраскати, Италия

<sup>4)</sup> Физический институт им. П.Н.Лебедева, Москва, Россия

<sup>5)</sup> НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

<sup>6)</sup>Торайгыров университет, Павлодар, Республика Казахстан

<sup>\*)</sup> e-mail: abds@tpu.ru

В работах /1-2/ исследована двух компонентная (гибридная) схема источника позитронов, в которой излучение релятивистских электронов в ориентированном кристалле (радиаторе) используется для рождения электрон-позитронных пар во второй мишени (конвертор). В работе /3/ предложен, а в работе /4/ развит метод свёрток для определения энергетических спектров и полного выхода позитронов в такой схеме.

В этой работе методом компьютерного моделирования определены зависимости полного выхода и энергетических спектров позитронов в лёгких (С и Si) и тяжёлом (W) конверторах. Также определены оптимальные толщины конверторов для максимизации полного выхода позитронов с учётом поглощения позитронов в конверторе.

В качестве источника фотонов выступает излучение при каналировании от 3 ГэВ электронов в кристалле W, что соответствует параметрам пучка на строящемся синхротроне (СКИФ) /5, 6/.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. R. Chehab, et al., //, Physics Letters B 2002, 525, 41.
2. X. Artru, et al., //, Nucl. Instr. Meth. B 2008, 266, 3868.
3. A. Dolgikh, Yu.P. Kunashenko, and Yu.L. Pivovarov, //, Nucl. Instr. Meth. B, 2003, 201, 253.
4. S. V. Abdrashitov, et al., //, Nucl. Instrum. Meth. B 2017, 402, 106.
5. С.М. Гуоров и др., //, Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед. 2020, 7, 3
6. <https://srf-skif.ru/>

ОРБИТАЛЬНЫЙ УГЛОВОЙ МОМЕНТ ИЗЛУЧЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ  
ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ВОЛНЫ.О.В. Богданов<sup>1)</sup>, П.О.Казинский<sup>2)</sup>, А.В. Куликова<sup>1\*)</sup><sup>1)</sup> Томский политехнический университет, Томск, Россия<sup>2)</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия

\*) e-mail: kulikova12@tpu.ru

Задача о генерации закрученных фотонов – излучения, обладающего орбитальным угловым моментом (ОУМ), хорошо теоретически изучена и является перспективной в плане возможных применений /1/. Уже существуют экспериментальные образцы передающих устройств таких фотонов в различных диапазонах энергий. Наиболее развитой областью исследования является оптический и радио диапазоны.

Ранее нами была представлены результаты исследования генерации закрученных фотонов релятивистскими частицами при каналировании в кристаллах. Методом Иваненко-Соколова /2/ и с помощью квантового подхода /3/ были исследованы плотности вероятности регистрации жестких фотонов с определённо заданной проекцией момента импульса для отдельных траекторий и пучка частиц.

В докладе рассмотрен другой способ генерации закрученных жестких фотонов – движение заряженных частиц в поле лазерной волны с круговой поляризацией. Представлены результаты численного моделирования ОУМ на один фотон близи конуса излучения  $1/\gamma$ . Проведен сравнительный анализ с результатами работы /4/.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. I.P. Ivanov, // Progress in Particle and Nuclear Physics, 2022, Volume 127, 103987
2. S.V. Abdrashitov, O.V. Bogdanov, P.O. Kazinski, T.A. Tukhfatullin, // Physics Letters A, 2018 382, 3141–3145
3. O.V. Bogdanov, P.O. Kazinski, T.A. Tukhfatullin, // Physics Letters A, 2022, 451, 28431
4. O.V. Bogdanov, P.O. Kazinski, G.Y. Lazarenko, // Physical Review D, 2019, 99, P.1-21

## ГЕНЕРАЦИЯ ФОНОНОВ И ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ КАНАЛИРОВАННОЙ ЧАСТИЦЕЙ В КРИСТАЛЛАХ

Е.А. Мазур<sup>1, 2, \*)</sup>

<sup>1)</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Москва, Россия

<sup>2)</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,  
Москва, Россия

\*) e-mail: eugen\_mazur@mail.ru

Рассмотрены процессы генерации фононов и электронных возбуждений квантовой ориентированной частицей в кристалле [1]. Рассчитаны вероятности возбуждения фононов и плазмонов квантовой каналированной частицей. Построена теория возбуждения кристалла каналированной частицей с одновременной эмиссией фотонов. Доказано, что все существенные черты структуры электронных и фононных возбуждений проявляют себя как компоненты спектра излучения в кристалле быстрой ориентированной заряженной частицы.

Рассчитана вероятность процесса с переходом быстрой частицы в виртуальное состояние после эмиссии плазмона с последующим испусканием фотона. Установлено, что вероятность процесса с испусканием фотона и плазмона того же порядка величины, что и вероятность стандартного процесса с испусканием фотона. Оценена возможность экспериментального обнаружения эффекта.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мазур Е.А. Возбуждение электронной и ионной подсистем полупроводника импульсом быстрых частиц // Кинетические явления в полупроводниках и диэлектриках. М.: Энергоатомиздат. 1985. С. 58-66.

## АДИАБАТИЧЕСКИЕ ИНВАРИАНТЫ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ В ИЗОГНУТОМ КРИСТАЛЛЕ

Н. П. Калашников\*, А. С. Ольчак\*\*

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”,  
Москва, Россия

\*e-mail: kalash@mephi.ru

\*\*e-mail: asolchak@mephi.ru

Рассматривается эффект каналирования в изогнутом монокристалле. В сопутствующей системе отсчета, движущейся вдоль плоскости или оси каналирования со скоростью, равной продольной компоненте скорости электрона, такое движение по сути является реализацией модели одномерного 1D-атома или двумерного 2D-атома, причем с управляемыми параметрами. Глубина и форма потенциала плоскости каналирования или ионной оси каналирования зависят как от химического состава, кристаллической структуры и ориентации кристалла, так и от величины энергии движущегося в плоскостном или осевом канале электрона. Важно, что режим движения в канале сохраняет устойчивость даже при движении в изогнутом монокристалле. Используя выражения для адиабатических инвариантов движения, в докладе оценивается максимальный угол изгиба монокристалла, при котором движение в режиме плоскостного или аксиального каналирования все еще сохраняет устойчивость. Демонстрируется, что предельный угол изгиба монокристалла не должен превышать критический угол каналирования Линдхарда, что ограничивает гипотетическую возможность использовать изогнутые монокристаллы для отклонения пучков ускоренных частиц лишь небольшими углами отклонения.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ БЫСТРЫХ ИОНОВ ЧЕРЕЗ КРЕМНИЙ

Н.В. Новиков\*, Н.Г. Чеченин, А.А. Широкова  
НИИЯФ МГУ, Москва, Россия  
\*e-mail: nvnovikov65@mail.ru

Количество электронов, образованных в процессе ионизации вблизи трека быстрого иона, характеризуется функцией  $n_e(x, r, t)$ , где  $x$  и  $r$  – продольная и аксиальная координаты вдоль трека иона,  $t$  – время (рис.1). При малых потерях энергии иона источники электронов равномерно распределены вдоль  $x$ . Количество рожденных в слое толщиной  $dx$  электронов  $N_e(x)$ , их начальное распределение по энергии  $E_e$  и углу вылета  $\theta$  определяются в первом борновском приближении.

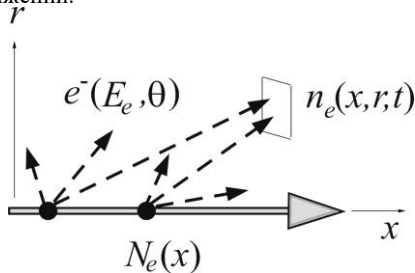


Рис.1 Модель для описания распределения количества электронов вблизи трека быстрого иона, движущегося вдоль оси  $x$  (обозначен крупной стрелкой). Пунктиром обозначены треки испускаемых атомом кремния электронов при отсутствии внешнего электрического и магнитного полей.

Потери энергии и угол рассеяния при прохождении электронов с  $E_e \geq 120$  эВ слоя кремния описываются методом Монте-Карло [1]. Равновесное распределение вторичных электронов вблизи трека иона вычисляется интегрированием по  $x$ , и характеризуется амплитудой  $\bar{n}_{\max}(d, r)$  и длительностью  $\Delta t(d)$  импульса.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Sempau J. et al. // NIM B. 2003. V. 207. P. 107.

ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ  
ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ В МОНОКРИСТАЛЛЕ  
ТАНТАЛАТА ЛИТИЯ

А.Н. Олейник<sup>1\*</sup>, М.Э. Гильц<sup>1</sup>, А.А. Кленин<sup>1</sup>, А.С. Кубанкин<sup>1,2</sup>,  
П.Г. Шаповалов<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>)НИУ БелГУ, Белгород, Россия

<sup>2</sup>) ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

<sup>3</sup>) НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

<sup>\*</sup>) e-mail: oleynik\_a@bsu.edu.ru

Реализация пироэлектрического эффекта в монокристаллах танталата лития в условиях вакуума позволяет получить квазиодноэнергетический поток электронов с энергией порядка нескольких десятков кэВ, которая может слабо меняться в течение продолжительного промежутка времени. Одновременное измерение тока и энергии частиц затруднено, однако модификация геометрии пироэлектрического ускорителя позволяет сделать одновременное измерение обоих параметров. Полученная вольт-амперная характеристика электронного потока представлена, определен лавинный разряд, способствующий стабилизации генерируемой разности потенциалов, механизм разряда обсуждается.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-00006.



## ЧЕРЕНКОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В МИШНЯХ С НАРУШЕННОЙ АЗИМУТАЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ

М.В. Булгакова, В.С. Малышевский, Г.В. Фомин  
Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия  
e-mail: vsmalyshevsky@sfnedu.ru

При косом влете частиц в мишень угловое распределение становится несимметричным, что ранее было установлено в ряде работ (см., например, /1/). В отличие от нормального падения, фазы отраженных от границ мишени волн не постоянны, а зависят от азимутального угла, что приводит к дополнительным интерференционным осцилляциям по азимутальному углу. Для решения задачи используются известные результаты, основанными на методе сшивок полей на границах раздела /2/.

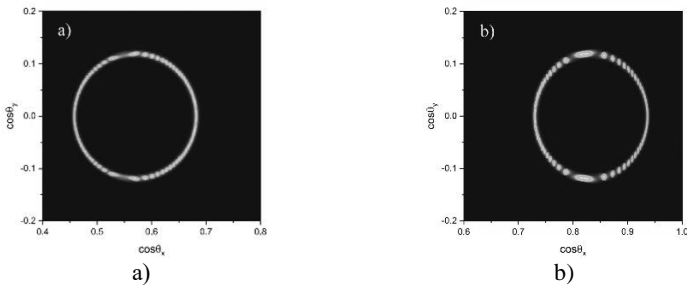


Рис.1 Расчитанное угловое распределение излучения ( $\lambda = 0.16 \mu\text{m}$ , ) Вавилова–Черенкова релятивистских электронов вблизи порога ( $\beta = 0.6$ ) в мишени из кварца, угол влета частиц в мишень: а) –  $\psi = 20^\circ$  ; б) –  $\psi = 30^\circ$ .

Интерференционные максимумы имеют малую угловую ширину. Эффект может найти применение для диагностики угловых характеристик пучков ускоренных релятивистских частиц.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. М.В. Булгакова, В.С. Малышевский, Г.В. Фомин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022, 3, 89.
2. Тер-Микаелян М.Л. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. Изд-во АН Арм. ССР, Ереван. 1969. 210 с.

## ЗАВИСИМОСТЬ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ ЛЕГКИХ ИОНОВ В ВЕЩЕСТВЕ ОТ СКОРОСТИ ПУЧКА ПЕРВИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Н.Н. Михеев, И.Ж. Безбах

ЛКМ ИК РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
г. Калуга, Россия  
e-mail: kmikran@spark-mail.ru

Представлены результаты аналитического описания зависимости зарядового состояния легких ионов в веществе от скорости пучка первичных частиц. Показано, что применение методики работы [1], основанной на учете зависимости зарядового состояния ионов пучка от отношения скорости ионов к минимальной скорости атомных электронов вещества, позволяет проводить расчеты тормозной способности  $S$  вещества адекватно экспериментальным результатам, как это приведено на Рис.1 для пучка ионов лития в алюминии.

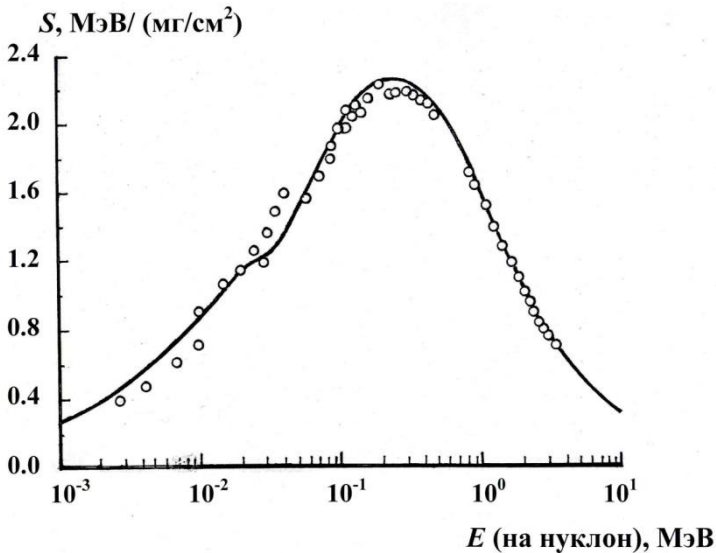


Рис. 1.  $SAI$  для ионов  $Li$ : — расчет;  $\circ$  – данные экспериментов исследователей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Михеев Н.Н., Безбах И.Ж. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. № 1. С. 25

ПРОСТАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ЭФФЕКТА БАРКАСА-АНДЕРСЕНА

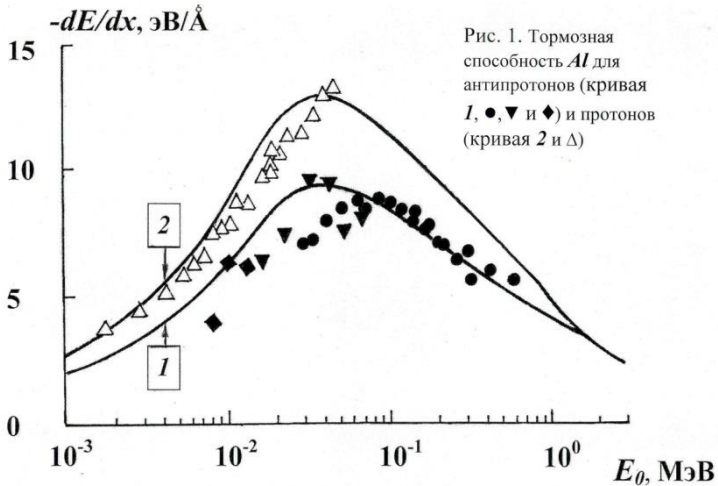
Н.Н. Михеев

ЛКМ ИК РАН - филиал ФНИЦ

«Кристаллография и фотоника» РАН, г. Калуга, Россия

e-mail: kmikran@spark-mail.ru

Работа посвящена решению фундаментальной задачи по установлению причин зависимости тормозной способности вещества для пучка ионов от знака полярности частиц. В рамках базовой концепции дискретного процесса торможения работы /1/ получены формулы, позволяющие рассчитывать зависимости  $dE/dx$  от  $E_0$  адекватно имеющимся экспериментальным результатам /2/, как это представлено, например, на Рис. 1 для антипротонов и протонов в алюминии.



ЛИТЕРАТУРА

1. Михеев Н.Н. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022, № 3, С. 94.
2. Møller S.P., Csete A., Tchioka T., Knudsen H., Uggerhøj U.I., Andersen H.H. // Phys. Rev. Lett. 2002, Vol. 88, 193201.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ОРИЕНТАЦИИ КРИСТАЛЛА НА УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИФРАГИРОВАННОГО ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

А.В. Бердниченко<sup>1)</sup>, А.В. Будко<sup>1)</sup>, И.Е. Внуков<sup>1,\*)</sup>, В.В. Колодочкин<sup>1)</sup>,  
Y. Takabayashi<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> НИУ «БелГУ», Белгород, Россия

<sup>2)</sup> SAGA Light Source, Tosu, Saga 841-0005, Japan

<sup>\*)</sup> e-mail: vnukov@bsu.edu.ru

В последнее время появился ряд работ, посвященных оценке размера, расходимости и эмиттанса пучков релятивистских электронов (позитронов) с помощью регистрации угловых распределений дифрагированного переходного излучения (ДПИ) частиц в тонких кристаллах /1,2/. Дифрагированное переходное излучение можно представить как результат отражения фотонов переходного излучения (ПИ) с характерным углом вылета фотонов  $\sim \gamma^{-1}$  на плоскостях кристалла. Поэтому при выполнении условия  $\omega \ll \gamma \omega_p$ , угловое распределение ПИ не зависит от энергии фотонов  $\omega$ , а определяется энергией частиц и расходимостью пучка.

В /1,2/ недооценен тот факт, что угловая область полного отражения рентгеновского излучения или, ширина так называемого столика Дарвина  $\Delta\theta$ , зависит от энергии фотонов и характеристик используемого кристалла. Поэтому с ростом энергии частиц угловые распределения ПИ и ДПИ начинают отличаться. В частности, для плоскости (111) кристалла кремния с максимальной отражающей способностью рентгеновского излучения величина  $\Delta\theta$  превышает характерный угол излучения электронов с энергией выше 10 ГэВ, что значимо искажает угловое распределение ДПИ. Обсуждаются пределы применимости методик /1,2/ и способы их расширения.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. S.V. Blazhevich et al.// Phys. Let. A 384 (2020) 127537.
3. Yu.A. Goponov et al. // NIM A 996 (2021) 165132.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНО  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ В НАПРАВЛЕНИИ [111]  
В КРИСТАЛЛЕ КРЕМНИЯ

В.В. Сыщенко<sup>1, \*)</sup>, А.И. Тарновский<sup>1)</sup>, А.С. Парахин<sup>1)</sup>, А.Ю. Исупов<sup>2)</sup>,

<sup>1)</sup> НИУ «БелГУ», Белгород, Россия;

<sup>2)</sup> ЛФВЭ, ОИЯИ, Дубна, Россия;

<sup>\*)</sup> e-mail: syshch@bsu.edu.ru

Потенциальная ямка, образуемая непрерывными потенциалами трех соседних цепочек [111] кристалла кремния, обладает симметрией треугольника, описываемой группой  $C_{3v} /1/$ . В этом случае разработанная ранее /2, 3/ процедура поиска собственных значений энергии поперечного движения каналированных положительно заряженных частиц (позитронов или протонов) и соответствующих этим значениям собственных функций гамильтониана, реализованная на квадратной пространственной сетке, приводит к возникновению артефактов численного моделирования. В докладе представлен алгоритм моделирования на основе гексагональной сетки, учитывающий симметрию задачи. Дано сравнение результатов обоих подходов. Разработанная процедура может быть использована в исследованиях проявлений квантового хаоса в каналировании /4, 5/.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика (нерелятивистская теория), М., Наука, 1989, 768 с.
2. Шульга Н.Ф., Сыщенко В.В., Неябова В.С. // Поверхность. 2013. № 3. С. 91.
3. Shul'ga N.F., Syshchenko V.V., Tarnovsky A.I., Isupov A.Yu. // Nuclear Instrum. Methods B. 2016. V. 370. P. 1.
4. Сыщенко В.В., Тарновский А.И. // Поверхность. 2021. № 7. С. 84.
5. Сыщенко В.В., Тарновский А.И., Дроник В.И., Исупов А.Ю. // Поверхность. 2022. № 3. С. 79.

## ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ НА ПРОВОДЯЩЕЙ МИШЕНИ В ВИДЕ ПРЯМОГО ДВУГРАННОГО УГЛА

В.В. Сыщенко<sup>\*)</sup>, А.И. Тарновский, В.А. Кривцов,  
НИУ «БелГУ», Белгород, Россия;

<sup>\*)</sup> e-mail: syshch@bsu.edu.ru

Переходное излучение заряженной частицы на бесконечной проводящей плоскости было предсказано в /1/ на основе известного из электростатики метода изображений /2/. В докладе с использованием этого же метода дано описание переходного излучения, возникающего при падении быстрой заряженной частицы на мишень в виде двух проводящих полуплоскостей, пересекающихся под прямым углом (рис. 1).

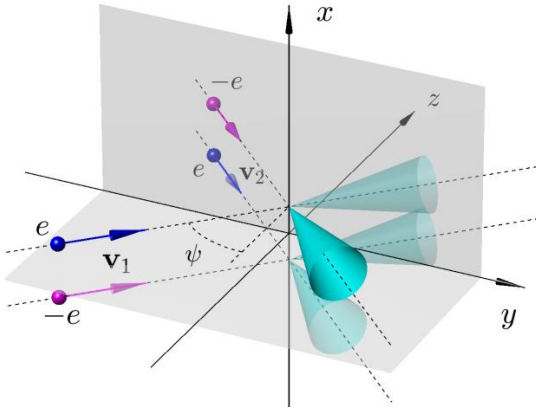


Рис. 1. Схематическое изображение четырех парциальных вкладов, интерференция которых создает наблюдаемое излучение.

Обсуждаются качественные особенности возникающего излучения в случаях быстрых и медленных частиц, а также возможность его использования для мониторинга пучков заряженных частиц.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург В.Л., Франк И.М. // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. № 1. С. 15.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред, М., Наука, 1992, 664 с.

## ОБ АНОМАЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В КРИСТАЛЛЕ КРЕМНИЯ

В.В. Сыщенко<sup>\*)</sup>, А.И. Тарновский, В.И. Дроник,  
НИУ «БелГУ», Белгород, Россия;  
<sup>\*)</sup> e-mail: syshch@bsu.edu.ru

Аномальной диффузией называют случайный процесс, при котором среднее значение квадрата смещения частицы от точки старта зависит от времени нелинейным образом:  $\langle r(t)^2 \rangle \sim t^m$ , где  $m$  отлично от единицы /1/ (для нормальной диффузии, или броуновского движения показатель степени равен единице). В /2/ было обнаружено, что такое поведение возможно для частиц высоких энергий, движущихся в кристалле в условиях, близких к условиям аксиального каналирования. В этом случае быстрое ( $m > 1$ ) смещение частицы в поперечной атомным цепочкам плоскости обусловлено временным захватом частиц в плоскостные каналы.

В настоящем докладе путем численного моделирования найдена величина показателя  $m$  для различных значений энергии поперечного движения электронов в плоскости (100) кристалла кремния. Установлено, что не во всех случаях поведение системы согласуется с результатами /2/.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Metzler R., Klafter J. // Phys. Reports. 2000. V. 339. P. 1.
2. Greenenko A.A., Chechkin A.V., Shul'ga N.F. // Phys. Lett. A. 2004. V. 324. P. 82.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СГУСТКА  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СФЕРЕ

В.В. Сыщенко<sup>\*)</sup>, А.И. Тарновский,

НИУ «БелГУ», Белгород, Россия;

<sup>\*)</sup> e-mail: syshch@bsu.edu.ru

В [1, 2] был предложен способ описания дифракционного излучения заряженной частицы на проводящей сфере, основанный на известном из электростатики методе изображений. В [2, 3] развитый подход был использован для вычисления поляризации возникающего излучения.

В настоящем докладе рассмотрена поляризация когерентного излучения, создаваемого на сфере радиуса  $R$  коротким сгустком частиц (pancake-bunch). Показано, что регистрация поляризации излучения позволяет оценить положения краев сгустка относительно центра сферы.

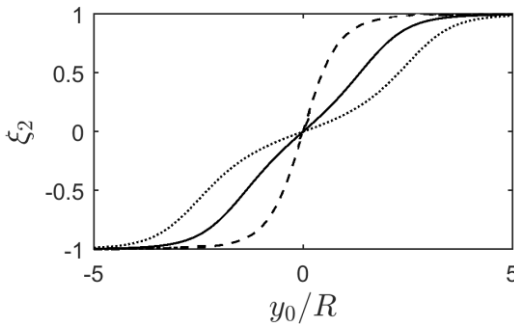


Рис. 1. Циркулярная поляризация излучения эллиптического сгустка размером  $6R$  (пунктир),  $4R$  (сплошная линия),  $R$  (штриховая) как функция прицельного параметра центра сгустка относительно центра сферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shul'ga N.F., Syshchenko V.V., Larikova E.A. // Nuclear Instrum. Methods B. 2017. V. 402. P. 167.
2. Shul'ga N.F., Syshchenko V.V. // Nuclear Instrum. Methods B. 2019. V. 452. P. 55.
3. Сыщенко В.В., Ларикова Э.А. // Поверхность. 2019. № 10. С. 108.



ВОЗБУЖДЕНИЕ ГИГАНТСКОГО ДИПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА  
ИЗЛУЧЕНИЕМ КАНАЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В КРИСТАЛЛЕ.

Н.А.Ашурко<sup>1\*)</sup>, О.В. Богданов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2)</sup> Томский политехнический университет, Томск, Россия

\*) e-mail: nik.ahurko@mail.ru

Исследование гигантского дипольного резонанса (ГДР), как коллективное ядерное возбуждение /1/, является актуальной областью теоретических и экспериментальных исследований. ГДР впервые наблюдался в экспериментах /2/ выполненных на тормозном  $\gamma$ -пучке. Интерес к этому фундаментальному явлению не ослабевает и в наши дни /3/.

Излучение при каналировании (ИК) электронов в кристаллах подробно изучено /4/ и представляет интерес в плане генерации высокоэнергетических фотонов. Спектр ИК электронов с суб-ГэВ и ГэВ энергиями характеризуется оптимальным по ширине максимумом и энергиями фотонов до нескольких десятков МэВ, этого достаточно для преодоления порога в фотоядерных реакциях легких ядер /5/. С другой стороны, при равной толщине первичной мишени выход ИК более чем на порядок превышает выход тормозного излучения, а также использование ориентационной зависимости спектра ИК может быть эффективно использовано для изучения гигантского дипольного резонанса тяжелых ядер.

Целью данной работы является исследование возбуждения ГДР в тяжелых ядрах Au, Pb и U излучением каналированных электронов в кристалле Si.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. A. Migdal // Phys. J. Phys USSR, 1944, 8 331
2. G.C. Baldwin, G.S. Klaiber // Phys. Rev., 1947, 71 3
3. A. Bracco, E.G. Lanza and A. Tamii, // Progress in Particle and Nuclear Physics, 2019, 106, 360–433
4. В.Н. Байер, В.М. Катков, В.М. Страховенко. Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах, 1989, Наука. Сиб. Отд., 400 с
5. O.V. Bogdanov, S.B. Dabagov, Yu. L. Pivovarov // NIM B, 2020, 465, 67–724.

ПОВЕДЕНИЕ ЧАСТИЦ ПОРОШКА НИОБАТА ЛИТИЯ В  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕМ.Э. Гильц<sup>1, \*</sup>, А.Н. Олейник<sup>1</sup><sup>1</sup>НИУ БелГУ, Белгород, Россия

\*) e-mail: mk-gilts97@mail.ru

Частицы ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), изготовленные диспергированием объемного монокристаллического образца, обладают теми же пьезоэлектрическими и сегнетоэлектрическими свойствами, что позволяет их рассматривать, как «виртуальные» электроды, которые могут служить источником электричества даже при незначительном изменении температуры или приложении внешнего электрического поля. Представлено экспериментальное исследование поведения ансамбля частиц порошка ниобата лития в зависимости от величины изменения температуры, величины приложенного электрического поля, комбинации этих двух факторов и размера самих частиц. Показан эффект самосборки частиц в сталагмитоподобные структуры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00082.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОНОВ В  
ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ УСКОРИТЕЛЕ

П.Г. Шаповалов<sup>1,\*</sup>, М.Э. Гильц<sup>2</sup> А.А. Кленин<sup>2</sup>, А.С. Кубанкин<sup>2,3</sup>,  
А.Н. Олейник<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

<sup>2)</sup> НИУ БелГУ, Белгород, Россия

<sup>3)</sup> ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: p\_shapovalov@list.ru

Поток электронов, эмитирующих с поверхности пироэлектрического кристалла, обладает двумя замечательными свойствами: поток самофокусируется на определенном расстоянии и энергия потока может слабо меняться в течение термического воздействия. Данные свойства определяются особенностями распределения заряда на поверхности пироэлектрического материала. Представлено компьютерное моделирование движения электронного потока в среде COMSOL Multyphysics. Обсуждается энергетическое и пространственное распределение частиц в фокальном пятне, показано влияние ударной ионизации молекул остаточного газа и мишени на генерацию вторичного электронного потока.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-00006.

ОРБИТАЛЬНЫЙ УГЛОВОЙ МОМЕНТ ИЗЛУЧЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ  
ЭЛЕКТРОНОВ, ПРИ ОСЕВОМ КАНАЛИРОВАНИИ В ТОНКОМ  
КРИСТАЛЛЕ Si

О.В. Богданов<sup>1)</sup>, П.О. Казинский<sup>2)</sup>, Т.А. Тухфатуллин<sup>3),\*)</sup>

<sup>1)</sup>Томский политехнический университет, Томск, Россия

<sup>2)</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>3)</sup>Торайгыров университет, Павлодар, Республика Казахстан

\*) tta@tpu.ru

Генерация излучения, обладающего орбитальным угловым моментом (ОУМ), подробно исследована как теоретически, так и экспериментально /1/. В ряде работ были предложены различные схемы генерации закрученных фотонов, несущих ОУМ: ондуляторы /2, 3/, комптоновское рассеяние /1, 4/, и лазеры на свободных электронах /5, 6/. Электроны, движущиеся в режиме каналирования, также могут излучать закрученные фотоны высоких энергий /7, 8/.

Излучение при каналировании имеет ряд преимуществ перед другими типами излучения – узкий спектральный диапазон и направленность. В нашей предыдущей работе /8/ было рассчитано среднее число закрученных фотонов на один электрон при плоскостном каналировании в кристалле кремния, а также их энергетический спектр. Была обнаружена периодическая зависимость проекции полного углового момента фотона от его энергии.

Целью данной работы является исследование излучения электронов при осевом каналировании в терминах закрученных фотонов /8/ и нахождение их энергетического спектра.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Б. А. Князев, В. Г. Сербо// УФН, 2018, Т. 188, № 5, 508-539.
2. S. Sasaki, I. McNulty// Phys. Rev. Lett., 2008, 100, 124801.
3. O.V. Bogdanov et al.// Phys. Rev. A 2018 97 033837.
4. O. V. Bogdanov et al.//Phys. Rev. D 2019, 99, 116016.
5. E. Hemsing, et al.// Phys. Rev. Lett., 2011, 106 164803.
6. P.R. Ribič, et al.// Phys. Rev. X, 2017, 7, 031036.
7. V. Epp, J. Janz, M. Zotova// Nucl. Inst. Meth. B 2018436 78.
8. O.V. Bogdanov et al.// Phys. Lett. A 2022, 451, 128431.

## ВЛИЯНИЕ МНОГОКРАТНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ НА ПРОБЕГИ ИОНОВ В МИШЕНЯХ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

А. И. Толмачёв<sup>1)</sup>, Л. Форлано<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Российский новый университет, Москва, Россия

<sup>2)</sup> Университет Калабрии, Козенца, Италия

e-mail: [tolmachev.alex@rambler.ru](mailto:tolmachev.alex@rambler.ru)

Упругие потери энергии в мишени пропорциональны числу столкновений между ионами и атомами мишени. Неупругие потери энергии /1/ пропорциональны пробегу ионов, который может существенно превышать толщину мишени из-за эффекта многократных столкновений /2/. Отношение среднего пробега ионов  $L$  к толщине мишени  $D$  зависит от энергии ионов, массы ионов  $M_1$  и массы атомов мишени  $M_2$ ,  $A = M_1/M_2$ . В настоящей работе отношение  $L/D$  вычислялось двумя способами – методом решения односкоростного уравнения переноса с дальнейшим выполнением обратного преобразования Лапласа /3/ и методом компьютерного моделирования с использованием программы PAOLA /4/. Показано, что зависимости отношения  $L/D$  от энергии ионов являются монотонными функциями, убывающими от максимального значения при малых энергиях до значения  $L/D \approx 1$  при больших энергиях. При фиксированной энергии ионов отношение  $L/D$  увеличивается с уменьшением массы ионов. Эффект оказывается наиболее заметным в случае легких ионов ( $A = 0$ ).

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Sigmund P. Particle Penetration and Radiation Effects. Volume 2. Heidelberg, Springer, 2014. 603 p.
2. Зиновьев А. Н., Бабенко П. Ю. // Письма в ЖЭТФ, 2022, том 115, выпуск 9, с. 603–606.
3. Chandrasekhar S. Radiative Transfer. Oxford, Clarendon Press, 1950. 393 p.
4. Толмачев А. И., Форлано Л. // ЖТФ, 2017, том. 87, выпуск 7, с. 973–978.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КИНЕТИКИ ПОВРЕЖДЕНИЯ В ТРЕКАХ БЫСТРЫХ  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ПОЛИЭТИЛЕНЕП.А. Бабаев<sup>1,\*</sup>, А.Е. Волков<sup>1,2)</sup><sup>1)</sup> ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Российская Федерация<sup>2)</sup> НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Российская Федерация

\*) e-mail: babaevpa@lebedev.ru

Образование треков быстрых тяжелых ионов в органическом полимере (полиэтилен, ПЭ) изучается с помощью комбинированного моделирования: Монте-Карло кода TREKIS [1], который описывает электронные возбуждения, с пакетом молекулярной динамики LAMMPS [2], который симулирует реакцию атомной системы. Реакционный потенциал AIREBO-M [3] позволяет описывать разрывы и образование химических связей и реакцию материала на вносимое возбуждение. Модель предсказывает треки круглой формы в аморфном полиэтилене и эллиптические треки в кристаллических частях — ламелях. Диаметры и формы треков согласуются с экспериментальными данными, полученными с помощью микроскопии высокого разрешения [4]. Моделирование показывает наличие в ПЭ эффекта скорости — влияние скорости ионов на параметры трека при одинаковых линейных потерях энергии. Получен масс-спектр фрагментов и их пространственное распределение в треке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. N A Medvedev et al 2015 J. Phys. D: Appl. Phys. 48 355303
2. S. Plimpton, Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics, J Comp Phys, 117, 1-19 (1995)
3. J. Chem. Phys. 142, 024903
4. J. Vetter et al, Radiation Effects and Defects in Solids, 1998, Volume 143, 273-286

## ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ В ОБЛАСТИ МЯГКОГО РЕНТГЕНА

И.А. Кишин<sup>1,2)</sup>, Е.Ю. Киданова<sup>1,\*)</sup>, А.С. Кубанкин<sup>1,2)</sup>,  
Р.М. Нажмудинов<sup>1,2)</sup>, В.И. Алексеев<sup>2)</sup>, А.Н. Елисеев<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Белгородский государственный научно-исследовательский университет,  
Белгород, Россия

<sup>2)</sup> Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН,  
Москва, Россия

\*) e-mail: 28kidanova28@gmail.com

При взаимодействии пучка релятивистских электронов со слоистой мишенью работает одновременно несколько механизмов формирования рентгеновского излучения: параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) и дифрагированное переходное излучение (ДПИ).

В работе представлены результаты исследований рентгеновского излучения релятивистских электронов в диапазоне от 200 до 500 эВ, образующегося в многослойных рентгеновских зеркалах. В эксперименте использовались два рентгеновских зеркала  $Co/C$  и  $Mo/B_4C$ .

Эксперименты были проведены в отделе физики высоких энергий ФИАН». В качестве источника релятивистских электронов использовался микротрон с энергией 7 МэВ. Рентгеновское излучение регистрировалось полупроводниковым детектором фирмы Amptek FAST SDD с тонким окном  $C_1$ . Угол наблюдения был рассчитан исходя из периодов рентгеновских зеркал, где возможна генерация излучения в диапазоне от 200 до 500 эВ. Исходя из расчётов угол наблюдения для  $Co/C$  составлял  $120^\circ$ , а для  $Mo/B_4C$  угол  $90^\circ$  относительно скорости движения электронов.

Работа была выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых-кандидатов наук МК-1320.2022.1.2

ВЛИЯНИЕ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ПИ И ДПИ  
РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОНА В ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СЛОИСТОЙ  
СРЕДЕ

С. В. Блажевич<sup>1)</sup>, А.В. Носков<sup>1,2)</sup>, А.Э. Федосеев<sup>1)</sup>,  
А.И. Чуева<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белгородский государственный университет, Белгород, Россия

<sup>2)</sup>Белгородский государственный технологический университет  
им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия

Развита теория когерентного рентгеновского излучения, генерируемого релятивистским электроном в периодической слоистой среде с двумя различными слоями на периоде. В геометрии рассеяния Брэгга рассматривается общий случай асимметричного отражения поля электрона относительно поверхности мишени. Получены выражения, описывающие спектрально-угловые характеристики ПИ и ДПИ в периодической слоистой среде с учетом многократного рассеяния электрона. Исследовано влияние многократного рассеяния электрона на характеристики рассматриваемых механизмов когерентного излучения. Выявлен значительный рост спектрально-угловой и угловой плотностей ДПИ при включении в расчет многократного рассеяния электрона. Данный эффект связан с подавлением составляющей поля ПИ, которая формируется при движении электрона в веществе мишени. Этот эффект отсутствует при ультрарелятивистских энергиях электронов и становится значительным при небольших значениях энергии электрона.



КОГЕРЕНТНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО  
ЭЛЕКТРОНА В ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СЛОИСТОЙ СРЕДЕ С ТРЕМЯ  
СЛОЯМИ НА ПЕРИОДЕ

С. В. Блажевич<sup>1</sup>), А.В. Носков<sup>1,2</sup>, А.И. Чуева<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>)Белгородский государственный университет, Белгород, Россия

<sup>2</sup>)Белгородский государственный технологический университет им. В. Г.  
Шухова, Белгород, Россия

Построена динамическая теория когерентного рентгеновского излучения, генерируемого релятивистским электроном в периодической слоистой среде с тремя различными слоями на периоде в геометрии рассеяния Брэгга. Рассматривается общий случай асимметричного рассеяния поля электрона на данной структуре, когда ее слои располагаются под углом к поверхности мишени. Получены и исследованы выражения, описывающие характеристики спектрально-угловой плотности когерентного рентгеновского излучения, представленной в виде суммы вкладов параметрического рентгеновского излучения (ПРИ), дифрагированного переходного излучения (ДПИ) и их интерференции. Проведено исследование параметров динамического рассеяния и поглощения (волны излучения) в рассматриваемой периодической структуре с тремя различными слоями на периоде. Показано, что использование периодической слоистой структуры с тремя различными слоями на один период позволяет значительно оптимизировать ее свойства отражать и (или) поглощать волны излучения, что затруднено в случае использования структуры с двумя слоями на один период.

О ВЛИЯНИИ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ПЕРЕХОДНОЕ  
РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ  
ПЛАСТИНЕ

В.А. Бондаренко<sup>1)</sup>, И.Н. Бардакова<sup>1)</sup>, С. В. Блажевич<sup>1)</sup>, А.В. Носков<sup>1,2)</sup>,  
А.А. Юрьева<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белгородский государственный университет, Белгород, Россия

<sup>2)</sup>Белгородский государственный технологический университет  
им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия

В настоящей работе исследовано переходное рентгеновское излучение, генерируемое релятивистским электроном, пересекающим монокристаллическую пластинку в геометрии рассеяния Брэгга. В рамках двухволнового приближения динамической теории дифракции получены выражения, описывающие спектрально-угловую плотность переходного излучения (ПИ) в виде вкладов переходных излучений от входной и выходной поверхности мишени и слагаемого, представляющего результат их интерференции. Для учета многократного рассеяния излучающих электронов в среде проведено усреднение каждого слагаемого спектрально-угловой плотности ПИ по угловому распределению электронов в пучке в виде функции Гаусса, меняющейся с длиной пути прохождения в мишени за счет многократного рассеяния. Выявлено, что спектрально-угловая плотность ПИ от выходной поверхности имеет постоянное значение в окрестности частоты Брэгга, а от входной поверхности меняется за счет динамической дифракции. Показано, что спектрально-угловая плотность ПИ зависит от многократного рассеяния электронов в среде. При многократном рассеянии электронов спектрально-угловая плотность ПИ может значительно возрасти по сравнению со спектрально-угловой плотностью ПИ без учета многократного рассеяния.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИФРАГИРОВАННОГО ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИНДИКАЦИИ РАСХОДИМОСТИ ПУЧКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СЛОИСТОЙ СРЕДЕ

С.В. Блажевич<sup>1</sup>), М.В. Бронникова<sup>1</sup>), И.Н. Бардакова<sup>1</sup>), А.В. Носков<sup>1,2)</sup>

<sup>1</sup>Белгородский государственный университет, Белгород, Россия

<sup>2</sup>Белгородский государственный технологический университет  
им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия

Впервые использовать дифрагированное переходное излучение (ДПИ) в монокристалле для индикации расходимости пучка релятивистских электронов было предложено и теоретически исследовано в работах [1,2]. В настоящей работе исследуется возможность использования дифрагированного переходного излучения пучка релятивистских электронов, пересекающего тонкую мишень с периодической слоистой структурой для индикации расходимости электронного пучка. В рамках динамической теории дифракции получено выражение для углового распределения дифрагированного переходного излучения (ДПИ) релятивистского электрона в периодической слоистой структуре, усредненного по угловому распределению электронов в пучке. На основе полученного выражения предложены варианты определения параметров расходимости пучка электронов путем решения задачи минимизации специальной целевой функции, сформированной на основе углового распределения ДПИ. Проведенные расчеты демонстрируют эффективность предлагаемых алгоритмов на примере ДПИ в слоистой структуре углерод-вольфрам.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. С. В. Блажевич, М.В. Бронникова, А.В. Носков // Тезисы докладов XLIX международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (ФВЗЧК-2019) , 29-31 мая, 2019 г., Москва, МГУ. С.82.
2. S.V. Blazhevich, M.V. Bronnikova, A.V. Noskov// Physics Letters A 384, Issue 16, (2020) 126321.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В GEANT4 ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ОСЕВОМ  
КАНАЛИРОВАНИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В  
МОНОКРИСТАЛЛАХ

А.А. Савченко<sup>\*</sup>), А.Д. Худякова, В. Вагнер  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, Российская Федерация  
<sup>\*</sup>) e-mail: aasavchenko1@mephi.ru

В данном докладе обсуждается создание и интеграция в программный комплекс Geant4 /1/ нового C++ модуля для расчета излучения инициированного ультррелятивистской заряженной частицей, двигающейся в монокристалле вдоль кристаллографических осей – когерентное тормозное излучение /2/, или, при условии захвата частицы осевым потенциалом, излучение при осевом каналировании /3/. Создаваемый нами модуль встраивается в Geant4 как дискретный набор физических процессов. Подобная форма интеграции даст возможность комбинировать новые физические процессы в монокристаллах с уже встроенными в Geant4 (обычное тормозное излучение, разные виды рассеяния как фотонов, так и первичных частиц и т. п.), что существенно увеличит качество моделирования. Непосредственное же вычисление излучения в Geant4 не только ускорит расчет, но и позволит описывать более сложные устройства.

Данная работа была поддержана грантом РФФИ 19-29-12036.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako et al., // Nucl. Instrum. Meth. A, 2003, 506, 250.
2. M.L. Ter-Mikaelian, High Energy Electromagnetic Processes in Condensed Media, New York, Wiley, 1972.
3. M. A. Kumakhov, // Phys. Lett., 1976, 57A, 17.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОБРАЗОВАНИЕ  
ТРЕКОВ БЫСТРЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В КАРБИДЕ КРЕМНИЯД.И. Зайнутдинов<sup>1,2\*)</sup>, А.Е. Волков<sup>2,3</sup><sup>1)</sup> НИЯУ МИФИ, Москва, Российская Федерация<sup>2)</sup> ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Российская Федерация<sup>3)</sup> НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Российская Федерация

\*) e-mail: d.zaynutdinov@lebedev.ru

Гибридная многомасштабная модель применена для описания структурных изменений в нанометрической окрестности траектории быстрого тяжелого иона (трек БТИ) в нагретом карбиде кремния (фаза 6H-SiC). Модель объединяет две части. Код Монте-Карло TREKIS [1–3] моделирует субпикосекундное возбуждение электронной и атомной подсистем материала в треке. Затем эволюция возбужденной решетки в треке БТИ моделируется с помощью пакета классической молекулярной динамики LAMMPS [4]. Модель предсказывает начало формирования аморфных треков БТИ в монокристалле SiC при повышении температуры окружающей среды до 700 К для ионов U с энергией 1 ГэВ и до 1600 К для ионов Xe с энергией 167 МэВ. Обсуждается температурная зависимость радиуса трека.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. N.A. Medvedev et al., J. Phys. D.: Appl. Phys., 2016, Vol. 49, № 36, P. 21–22
2. N.A. Medvedev et al., J. Phys. D.: Appl. Phys., 2015, Vol. 48, № 35, 355303
3. Medvedev N.A. et al., J. Phys. D.: Appl. Phys., 2016, Vol. 49, № 36, P. 21–22.
4. Medvedev N.A. et al., J. Phys. D.: Appl. Phys., 2015, Vol. 48, № 35, 355303
5. Rymzhanov R.A. et al., Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B, 2016, Vol. 388, P. 41–52.
6. Plimpton S., J Comp Phys., 1995, Vol. 117, P. 1–19.

АТЕРМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ДИЭЛЕКТРИКАХ ПРИ ВЫСОКИХ  
ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЯХР.А. Воронков<sup>1\*)</sup>, Н.А. Медведев<sup>2,3)</sup>, А.Е. Волков<sup>1)</sup><sup>1)</sup> Физический Институт Академии Наук, Москва, Россия<sup>2)</sup> Институт Физики, Прага, Чехия<sup>3)</sup> Институт Физики Плазмы, Прага, Чехия

\*) e-mail: roman.a.voronkov@gmail.com

Облучение твердых тел быстрыми тяжелыми ионами (БТИ) изначально приводит к экстремальному возбуждению электронной подсистемы мишени. Валентные электроны участвуют в формировании межатомного потенциала. Модификация распределения электронов по состояниям приводит к мгновенной, с точки зрения динамики атомов, модификации этого потенциала. Синергетический эффект изменения свойств атомной и электронной подсистемы может стимулировать необычные превращения в мишени в треках БТИ на временных масштабах 10-100фс после пролёта иона.

Теория функционала плотности привлечена для описания основных подобных эффектов: атермического плавления (сверхбыстрое разупорядочение атомной решётки без значительного повышения температуры решетки), и изменений в зонной структуре. Продемонстрировано возникновение экзотических состояний, получение которых возможно только атермическим способом /1,2/.

## ЛИТЕРАТУРА

1. R. A. Voronkov, N. Medvedev, and A. E. Volkov, // Sci. Reports, 2020, 10, 13070.
7. R. A. Voronkov, N. Medvedev, and A. E. Volkov, // Sci. Reports, 2022, 12, 5659

РАЗРАБОТКА И АППРОБАЦИЯ ИСТОЧНИКА ПОЗИТРОНОВ НА ОСНОВЕ  
ИЗОТОПА CU-64 ДЛЯ IN SITU ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ-НАКОПИТЕЛЕЙ ВОДОРОДА В ПРОЦЕССЕ  
ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ ДЕСОРБЦИИ ВОДОРОДА

Р.Р. Эльман<sup>1\*)</sup>, В.Н. Кудияров<sup>1\*)</sup>, Р.С. Лаптев<sup>1)</sup>, Ю.С. Бордулев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: rre1@tpu.ru

Разработана методика создания источника позитронов на основе изотопа Cu-64. Для разработки методики были проведены необходимые расчеты и выдвинуты требования к условиям подготовки и получения изотопа с требуемыми характеристиками. Произведена реализация изотопа Cu-64 для проведения *in situ* измерений во время термостимулированной десорбции водорода из водород-аккумулирующих материалов на основе магния с учетом всех особенностей получения и эксплуатации данного источника. Параметры формы линий S, W, R изменяются по простой линейной модели в диапазоне активности (12–40) МБк. Качество спектров и эффективность регистрации улучшаются при снижении активности до (2–7) МБк. Основные характеристики полученного источника: время подготовки - 6 часов; активность источника - (40–70) МБк; срок годности - 2 дня; метод исследования - метод Доплеровского уширения аннигиляционной линии.

Используя разработанный источник позитронов, были получены новые экспериментальные данные об относительном изменении параметров S и W в зависимости от давления и температуры при десорбции водорода из композита. Определено, что добавление углеродных нанотрубок к порошку Mg и MgH<sub>2</sub> приводит к смещению импульсного распределения аннигиляции позитронов в низкоэнергетическую область. Основным центром захвата позитронов для MgH<sub>2</sub> в данном случае является терморасширенная решетка магния, а в композите – особые морфологические места встраивания углеродных наночастиц/нанотрубок в решетку магния.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания «Наука» в рамках научного проекта FSWW-2023-0005.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОРМОЗНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ ДЛЯ ЛЕГКИХ ИОНОВ ПРИ ПОМОЩИ РЕЗОНАНСНОГО РАССЕЙНИЯ

Т.Л. Бобровский\*, А.Ф. Гурбич, П.С. Прусаченко  
АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г. Обнинск, Российская Федерация  
\*e-mail: timofeybobrovskiy@gmail.com

При энергии выше кулоновского барьера сечение упругого рассеяния легких ионов на большинстве ядер имеет резонансную структуру. Эта структура наблюдается в спектрах обратного рассеяния ионов на толстой мишени, причем положение соответствующих особенностей в регистрируемом энергетическом спектре зависит не только от начальной энергии иона и энергии резонанса, но и от тормозной способности вещества мишени. Чем выше начальная энергия иона, тем больше пробег тормозящегося в мишени иона до достижения им резонансной энергии, т.е. резонансное взаимодействие происходит на большей глубине, что отражается в энергетическом спектре вылетающих из мишени рассеянных ионов. Таким образом, появляется возможность определения тормозной способности из анализа спектров обратного рассеяния. Такой подход был применён для определения тормозной способности  $\alpha$ -частиц в углероде. Эксперимент состоял в измерении спектров упругого рассеяния  $\alpha$ -частиц на мишени из пиролитического графита для ряда энергий выше резонансной энергии 4.26 МэВ. Информация о тормозной способности была извлечена из анализа смещения наблюдаемых на спектрах особенностей в зависимости от начальной энергии ионов. Была также определена погрешность полученной тормозной способности, которая оказалась равной 2-3%. Приводится сравнение полученной тормозной способности с табличными данными.



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В КРИСТАЛЛАХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

А.В. Бердниченко<sup>1)</sup>, Е.В. Быков<sup>1)</sup>, И.Е. Внуков<sup>1, \*)</sup>, В.В. Колодочкин<sup>1)</sup>,  
А.С. Складорова<sup>1)</sup>, Y. Takabayashi<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> НИУ «БелГУ», Белгород, Россия

<sup>2)</sup> SAGA Light Source, Tosu, Saga 841-0005, Japan

<sup>\*)</sup> e-mail: vnukov@bsu.edu.ru

Хорошее согласие результатов расчета выхода и угловых распределений рентгеновского излучения электронов в кристаллах в рамках кинематической теории параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) с экспериментальными данными /1,2/ позволяет использовать результаты измерений ПРИ для определения параметров экспериментальной аппаратуры.

Наиболее интересной представляется оценка зависимости чувствительности рентгенографических пластин (РП) от энергии фотонов. В последнее время РП производятся несколькими фирмами и широко используются в медицине, рентгеновской дефектоскопии и других областях науки и техники для измерения пространственного распределения пучков ионизирующего излучения. Следует отметить, что информация о точном составе пластин и их плотности в литературе отсутствует.

Приведены результаты обработки результатов измерений угловых распределений ПРИ электронов с энергией 255 МэВ в кристалле кремния с помощью РП нескольких типов, выполненных на линейном ускорителе Saga-LS. Определена спектральная зависимость чувствительности РП для энергий фотонов двух порядков отражения и отражающих плоскостей (111) и (110). Сделана оценка плотности исследованных пластин.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. К.-Н. Brenzinger et al. Phys. Rev. Lett. 1997 V.79 2462.
8. Yu.A. Goponov et al. // NIM B, 2015, V. 355, P.150.



**Секция IV**

**МОДИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ  
ИОННЫМИ И ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ**



## ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ: НАНОПОРИСТЫЙ ГЕРМАНИЙ

А.Л. Степанов

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ

КазНЦ РАН, Казань, Россия

e-mail: aanstep@gmail.com

Рассмотрен эффект образования слоев нанопористого Ge при низкоэнергетической высокодозовой имплантации пластин монокристаллического с-Ge ионами переходных металлов ( $^{52}\text{Cr}^+$ ,  $^{55}\text{Mn}^+$ ,  $^{56}\text{Fe}^+$ ,  $^{59}\text{Co}^+$ ,  $^{59}\text{Ni}^+$ ,  $^{63}\text{Cu}^+$ ,  $^{108}\text{Ag}^+$ ,  $^{115}\text{In}^+$  и  $^{122}\text{Sb}^+$ ) в дополнение к ранее опубликованным данным [1]. Представлены результаты по особенностям образования [2], а также по физико-химическим характеристикам pGe слоев, в зависимости от условий и параметров ионной имплантации. Пример поверхности нанопористого Ge приведен на Рис. 1.

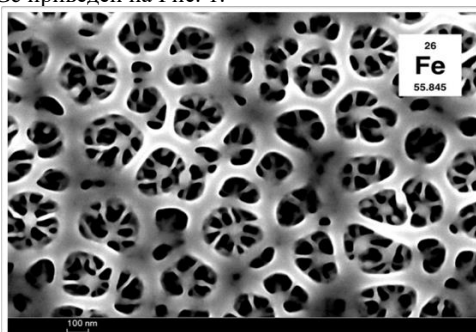


Рис.1 Изображение, полученное на сканирующем электронном микроскопе, поверхности нанопористого Ge, сформированной низкоэнергетической имплантацией ионами  $^{56}\text{Fe}^+$ .

Работа выполнена при поддержке грантом РФ № 19-79-10216.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.Л. Степанов, В.И. Нуждин, В.В. Воробьев, А.М. Рогов, Формирование слоев пористого кремния и германия с металлическими наночастицами, Казань, ФИЦПРЕСС 2019.
2. А.Л. Степанов, А.М. Рогов, В.И. Нуждин, В.Ф. Валеев. Способ изготовления подложки монокристаллического германия с тонким поверхностным слоем пористого германия. Патент РФ. № 2737692, 2019.

## ВЛИЯНИЕ ОСАЖДЕНИЯ АТОМОВ Ва И ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ Ва<sup>+</sup> НА ЭЛЕКТРОННУЮ СТРУКТУРУ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО Ge

Р.М. Ёркулов<sup>1</sup>, Б.Е. Умирзаков<sup>2</sup>, Г.Х. Аллаярова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Каршинский государственный университет, Карши, 180117 Узбекистан  
e\*-mail: allayarova5030@mail.ru

<sup>2</sup>Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент 100095 Узбекистан

На рис. 1 приведены УФЭС для Ge(111) р-типа, покрытого пленкой Ва разной толщины, осажденной при комнатной температуре. По оси абсцисс отложена энергия связи  $E_{\text{bind}}$  электронов, энергия уровня Ферми  $E_F$  германия определяется относительно уровня Ферми чистого Pd. Из рис. 1 видно, что на спектре чистого Ge (111) р-типа обнаруживаются явно выраженные особенности при энергиях  $-0.8$ ,  $-1.6$ ,  $-3.5$  и  $-5.1$  eV. Наличие этих особенностей связано с возбуждением электронов из поверхностных состояний (SS), а также из  $4p$ ,  $4s$  и гибридных  $4p + 4s$  уровней Ge (рис., кривая 1).

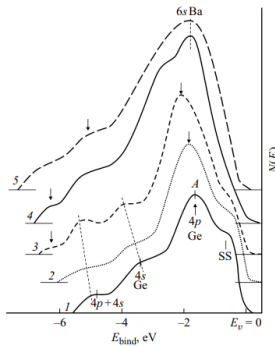


Рис. 1. Ультрафиолетовые фотоэлектронные спектры Ge (111) р-типа с пленкой бария толщиной  $\theta$ , монослоя: 1 — 0, 2 — 0.2, 3 — 0.6, 4 — 1.0, 5 — 2.0,  $h\nu = 10.8$  eV ( $h\nu$  — энергия фотонов).

### ЛИТЕРАТУРА

1. В.Е. Умирзаков, Д.А. Ташмухамедова, Е.У. Болтаев, А.А. Дзхуракхалов. Mater. Sci. Eng. B, 101, 124 (2003).
2. R. Geiger, T. Zabel, H. Sigg. Front. Mater., 2, 52 (2015).  
<https://doi.org/10.3389/fmats.2015.00052>

ОСОБЕННОСТИ РОР ИССЛЕДОВАНИЙ СТРУКТУР, СОДЕРЖАЩИХ  
ВАКАНСИИ И ПУСТОТЫВ.К. Егоров<sup>1\*)</sup>, Е.В. Егоров<sup>1,2)</sup>, А.И. Ильин<sup>1)</sup>, А.А. Иванов<sup>3)</sup><sup>1)</sup> ИПТМ РАН, Черноголовка, Россия<sup>2)</sup> ИРЭ РАН, Фрязино, Россия<sup>3)</sup> МИФИ, Москва, Россия

\*) e-mail: egorov@iptm.ru

Интерпретация данных РОР исследований предполагает, что изучаемый объект представляет собой однородный континуум с отсутствием ориентационно выделенных направлений. Однако при нанесении пленочных покрытий возможно образование пирамидальных и спиральных образований, окруженных пустотами. Если толщина планарного слоя с пирамидально-спиральными конструкциями превышает размер, определяемый энергетическим разрешением детекторной системы, возникает неопределенность при определении элементного концентрационного профиля по глубине, которая может быть нивелирована путем принудительного изменения значений сечения рассеяния ионов на ядрах атомов, составляющих пирамидально-спиральные образования. Уменьшение значений сечения рассеяния позволяет учесть наличие структурных пустот в пленочном покрытии до величин в десятки процентов. В работе представлены результаты аппроксимации спектров РОР ионов гелия, полученных для пленочных покрытий высокотемпературных сверхпроводников  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ , которые, как это следовало из электронно-микроскопических исследований, характеризовались наличием на поверхности слоев толщиной 100-300 нанометров, представляющих собой пирамидально-спиральную агломерацию с высокой концентрацией структурных пустот. Аппроксимация выполнялась с помощью программы RUMPP, представляющей модернизированную программу RUMP дополненную блоком модификации расчета значений сечения рассеяния ионов гелия на ядрах различных элементов. Обсуждаются пределы допустимости предлагаемой аппроксимационной процедуры.

Работа выполнена в рамках государственного задания №075-01304-23-00.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ LOW-K  
ДИЭЛЕКТРИКОВ В ТРЕНЧАХ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМОЙ С  
ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

А.А. Соловых<sup>1,2)</sup>, А.А. Сычева<sup>2, \*)</sup>, Е.Н. Воронина<sup>1,2)</sup>, О.В. Прошина<sup>2)</sup>,  
Т.В. Рахимова<sup>2)</sup>, А.П. Палов<sup>2)</sup>, А.Т. Рахимов<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup> Московский государственный университет имени  
М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

<sup>2)</sup> НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына  
МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: sycheva.phys@gmail.com

Использование материалов с низкой диэлектрической проницаемостью (*low-k* диэлектриков) в качестве межслойных изоляторов в современных интегральных схемах позволяет значительно повысить быстродействие этих устройств. Однако воздействие плазмы, которая активно применяется на разных этапах производства, способно вызвать значительную деградацию свойств таких материалов. Процессы, происходящие как самой в плазме, так и вблизи поверхности *low-k* диэлектрика, относятся к различным пространственно-временным масштабам, поэтому для их моделирования необходимо применять многомасштабные подходы с использованием различных методов и моделей.

В рамках данной работы подобный подход был применен для определения оптимальных условий проведения предварительной обработки *low-k* диэлектриков с целью удаления гидрофобных  $\text{CH}_3$ -групп из тонкого верхнего слоя материала (функционализации) в условиях плазмы несамостоятельного высокочастотного разряда с внешней ионизацией электронным пучком (1 кэВ) [1, 2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Palov A.P., Proshina O.V., Rakhimova T.V., Rakhimov A.T., Voronina E.N. // Plasma Process. Polym., 2021, 18, №7, 2100007.
2. Voronina E.N., Sycheva A.A., Solovykh A.A., Proshina O.V., Rakhimova T.V., Palov A.P., Rakhimov A.T. // J. Vac. Sci. Technol. B, 2022, 40, № 6, 062203.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

З.А. Шарипов<sup>1,\*</sup>, Б. Батгэрэл<sup>1,3</sup>, И.В. Пузынин<sup>1</sup>, Т.П. Пузынина<sup>1</sup>,  
И.Г. Христов<sup>2</sup>, Р.Д. Христова<sup>2</sup>, З.К. Тухлиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>2</sup>) Софийский университет “Св. Климент Охридски”, София, Болгария

<sup>3</sup>) Монгольский государственный университет науки и технологий,  
Улан-Батор, Монголия

<sup>\*</sup>) e-mail: zarif@jinr.ru

В работе методом молекулярной динамики проведено исследование процессов взаимодействия ионов гелия с энергиями из диапазона 10 эВ-1мэВ с мишенью из вольфрама. Вольфрам и композиты на его основе является перспективным материалом для использования в термоядерных реакторах будущего поколения [1,2]. Для математического моделирования воздействия различных видов облучения на вольфрам в основном используется метод молекулярной динамики. В работе получены результаты численного моделирования: пороговая плотность энергии, приводящие к структурным изменениям в облучаемой мишени в зависимости от энергии иона гелия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта №20-51-44001.

### ЛИТЕРАТУРА

1. J. Knaster, A. Moeslang and T. Muroga. Materials research for fusion. Nature Physics 12(2016) 424-433.
2. S. Wurster, N. Baluc, M. Battabyal, et al., Recent progress in R&D on tungsten alloys for divertor structural and plasma facing materials. J. Nucl. Mater. 442(2013), 181-189.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПЫЛЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК C, Cr, Co

Т.З. Гусейнов<sup>1)</sup>, О.Р. Бакиева<sup>2, \*)</sup>, Р.Г. Валеев<sup>2)</sup>, А.Н. Бельтюков<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Удмуртский Государственный Университет, г. Ижевск, Россия

<sup>2)</sup> Удмуртский Федеральный Исследовательский Центр УрО РАН,  
г. Ижевск, Россия

\*) e-mail: ftiran@mail.ru

При исследовании и создании устройств на основе наноразмерных плёнок или покрытий существенную роль играет химический состав и структура синтезируемых слоев. Также особое влияние имеет порядок чередования слоев в многослойных системах и их размерность. Одним из классических поверхностно-чувствительных методов исследования элементного состава является оже-электронная спектроскопия, глубина анализа которого составляет 1-3 нм. Для определения изменений концентрации химических элементов по глубине образца используется метод распыления поверхности ионами инертного газа. В данном ключе особую актуальность имеет определение скорости распыления тонких слоев различных химических элементов, поскольку они могут существенно отличаться от скорости распыления объемных материалов.

В настоящей работе объектами исследования являлись тонкие (~30 нм) пленки C/Si, C/Co, C/Cr и многослойная система C/Co/Cr синтезированные методом магнетронного напыления на подложку из монокристаллического кремния. Для определения изменений элементного состава по глубине образца использовался метод оже-электронной спектроскопии в комплексе с травлением ионами аргона. Построены зависимости изменения концентрации химических элементов в зависимости от глубины профилирования. Определены скорости распыления тонких плёнок.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ №121030100002-0. Исследования проводились с использованием оборудования центра коллективного пользования «Поверхность и новые материалы» УдмФИЦ УрО РАН.

## СПЕКТРЫ ОДМР NV<sup>-</sup> ЦЕНТРОВ В НАНОСЛОЯХ И НАНОСТОЛБАХ АЛМАЗА ПОСЛЕ ТРАВЛЕНИЯ СФОКУСИРОВАННЫМ ПУЧКОМ ИОНОВ Ga

С.Н. Подлесный<sup>1)</sup>, В.А. Антонов<sup>1)</sup>, В.П. Попов<sup>1),\*</sup>  
<sup>1)</sup> ИФП СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск, Россия  
<sup>\*</sup>) e-mail: popov@isp.nsc.ru

Для формирования ансамблей, содержащих от 25 до 2500 NV центров (Рис. 1), на пластинах алмаза с NV центрами изготавливались матрицы из круглых меза-структур (наностолбов) диаметром 50-300 нм и высотой от 300 до 500 нм с периодом 1.5 – 3 мкм безмасочным ионным травлением сфокусированным ионным пучком (FIB) Ga<sup>+</sup> (Рис. 1а).

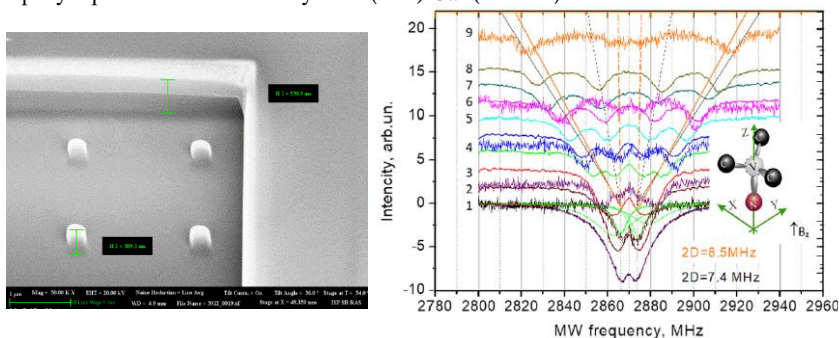


Рисунок 1 (а) СЭМ микроизображение массива 3×3 наностолбов алмаза диаметром 300 нм и высотой 400 нм, содержащих 2500 NV<sup>-</sup> центров; (б) спектры ОДМР NV центров, индуцированных протонами с энергией 36 кэВ (H<sup>2+</sup>, 72 кэВ, 3×10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup>), при непрерывной накачке сфокусированным лазерным пучком диаметром 2 мкм на длине волны  $\lambda=532$  нм в образце типа Ib в нормальном к поверхности магнитном поле напряженностью: Спектры сдвинуты по вертикали на величину, равную магнитной индукции в Гс.

После FIB интенсивность ФЛ в наностолбе при  $\lambda = 637.5$  нм в 15 раз меньше, чем в сплошном слое, что соответствует 2500 NV<sup>-</sup> центров в нем. В отличие от сплошного слоя, в спектрах ОДМР видны резонансы от NV центров с осью вдоль столба (Рис. 1б), что соответствует теоретической модели [1].

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК  $1\text{SiO}_2:25\text{ZrO}_2$  МЕТОДОМ RBS

Ю.В. Алексеенко<sup>1\*)</sup>, Н.Н. Губанова<sup>2)</sup> Т.В. Phuc<sup>1,3,4)</sup>, Т.Ю. Зеленьяк<sup>1)</sup>,  
А.С. Дорошкевич<sup>1)</sup>, А. И. Кругляк<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>2)</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова  
НИИЦ “Курчатовский институт”, Гатчина, Россия

<sup>4)</sup> Graduate University of Science and Technology,  
Vietnam Academy of Science and Technology (VAST), Ha Noi, Vietnam;

<sup>4)</sup> Institute of Physics, VAST, Ha Noi, Vietnam;

<sup>\*)</sup> e-mail: beataa@gmail.com

Тонкие пленки смешанного состава  $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ , где на 1 атом Si приходится 25 атомов Zr, были получены из зольей методом ‘spin-coating’ (центрифугирования). Основной задачей было определение влияния скорости вращения центрифуги на толщину и элементный состав пленок. Исследование проводилось методом резерфордского обратного рассеяния с высоким энергетическим разрешением на электростатическом генераторе ЭГ-5 ЛНФ им. И. М. Франка. Описание эксперимента и использованных программ дано в статье /1/.

Анализ показал, что во всех тонких пленках  $1\text{SiO}_2:25\text{ZrO}_2$  в приповерхностном слое содержатся такие элементы, как Zr и O. Моделирование спектров RBS показало, что формируется тонкая пленка толщиной ~ 5-19 нм. Так же был произведен элементный анализ состава подложки (покровного стекла), в котором были обнаружены следующие элементы: Ca, P, Si, O, C

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. P.L. Tuan, M. Kulik, T.V. Phuc, T.Yu. Zelenyak, M. Turek, J. Zuk, C. Mita, A. Stanculescu, A.S. Doroshkevich, B. Jasinska, L.H. Khiem, N.N. Anh, N.T. Bao My, // Materials Science and Engineering: B , 2022, том 277, с. 115566

РОР ИССЛЕДОВАНИЯ ИСХОДНЫХ И ОБЛУЧЕННЫХ ПУЧКАМИ ИОНОВ  
ГЕЛИЯ ОБРАЗЦОВ ВЭС CoCrFeNi и CoCrFeNiMn

Б.С. Аманжулов<sup>1,2</sup>, И.А. Иванов<sup>1\*</sup>, А.Е. Рыскулов<sup>1</sup>, В.В. Углов<sup>3</sup>,

С.В. Злоцкий<sup>3</sup>, М.В. Колобердин<sup>1</sup>, А.Е. Курахмедов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики МЭ РК, Астана, Казахстан

<sup>2</sup> Евразийский Национальный Университет, гАстана, Казахстан

<sup>3</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Белоруссия

\*igor.ivanov.inp@gmail.com

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) CoCrFeMnNi и CoCrFeNi, были облучены пучками ионов гелия с энергией 40 кэВ до флюенсов  $5 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> и  $2 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup> на циклотроне ДЦ-60, и были исследованы методом резерфордского обратного рассеяния (РОР) на пучках ионов азота <sup>14</sup>N<sup>2+</sup> с энергией 14 МэВ.

РОР спектры на Рисунке 1 показывают, что элементные составы сплавов CoCrFeNi и CoCrFeMnNi являются близкими к эквиатомным до и после облучения – около 25 и 20 ат. %, соответственно. Однородное распределение элементов по глубине в двух ВЭС также сохранилось при облучении.

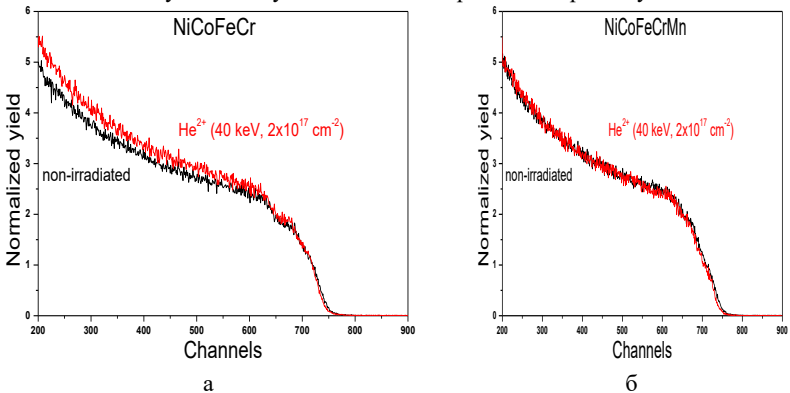


Рис. 1 – РОР спектры исходных и облученных ионами He<sup>2+</sup> (40 кэВ,  $2 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup>) ВЭС CoCrFeNi (а) и CoCrFeMnNi (б)

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP14872199).

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО АССИСТИРОВАНИЯ  
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ НАНОМЕТРОВЫХ  
ПЛЕНОК СПЛАВА Al-Fe

И.И. Ташлыкова-Бушкевич  
Белорусский госуниверситет информатики  
и радиоэлектроники, Минск, Беларусь  
e-mail: iya.itb@bsuir.by

Расширению областей применения оптических пленок металлов и их сплавов способствует успех их применения в солнечной фотоэнергетике и микро-, нано- и оптоэлектронике. В настоящей работе представлены результаты сравнительных исследований морфологии, топографии и смачивающих свойств нанометровых пленок слаболегированного сплава Al-Fe в зависимости от режима осаждения на стеклянные подложки с использованием резонансного ионного источника вакуумной электродуговой плазмы. Аналитический анализ наноразмерных неоднородностей на поверхности пленок выполнен с помощью сканирующей зондовой микроскопии. Размер и объемная доля микрочастиц капельной фракции определены с использованием растровой электронной микроскопии. Методом покоящейся капли выполнено измерение краевого угла смачивания поверхности пленок.

Установлены количественные соотношения, связывающие микрогеометрию поверхности пленок сплава Al-Fe с условиями осаждения. Для описания нанорельефа пленок применены параметры шероховатости стандартов ИСО вместе с параметрами-безразмерными комплексами. Обнаруженные закономерности эволюции субмикронной конусообразной морфологии пленок при ионно-ассистированном осаждении позволили определить, что смачивание пленок дистиллированной водой имеет гетерогенный характер и описывается моделью Касси-Бакстера. Полученные результаты показывают, как использование ионно-плазменных технологий при формировании тонкопленочных структур позволяет в широких пределах управлять их физико-химическими и эксплуатационными свойствами.

## ОБРАЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОКСИДЕ ГАЛЛИЯ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ ПРОТОНОВ

В.В. Козловский<sup>1\*)</sup>, А.Э. Васильев<sup>1)</sup>, Е.Е. Журкин<sup>1)</sup>, А.А. Лебедев<sup>2)</sup>,  
М.Е. Левинштейн<sup>2)</sup>, А.М. Стрельчук<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2)</sup> Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе,  
194021, Санкт-Петербург, Россия

\*) e-mail: kozlovski@physics.spbstu.ru

Путем компьютерного моделирования индивидуальных каскадов смещений рассмотрены особенности генерации пар Френкеля в Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при торможении протонов с энергиями от 8 до 15 МэВ. Рассчитаны плотности распределения энергий, полученных не только первично выбитыми атомами, но и атомами отдачи, генерируемыми в ходе формирования каскадов. При анализе полученных распределений выделены две области энергий. В области малых энергий преобладает процесс спонтанной рекомбинации генетически родственных ПФ. Атомы отдачи второй области обладают большей энергией, что позволяет им покинуть зону спонтанной рекомбинации, и ПФ диссоциирует на изолированные компоненты.

Расчеты показали, что при протонном облучении Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> доля вакансий, созданных непосредственно протонами, составляет всего 12% для подрешетки кислорода. Остальные 88% создаются атомами отдачи в каскадных процессах. Для подрешетки галлия эти цифры составляют 25 и 75%, соответственно. Поэтому, процессы компенсации проводимости Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, наблюдаемые при протонном облучении, будут определяться глубокими центрами, созданными не ПВА, а атомами отдачи, образованными в каскадах смещений. Проведено сравнение с экспериментальными данными и оценена доля ПФ, диссоциирующих в процессе облучения.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 22-12-00003.

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ $Ga_2O_3$ В ОКСИДНЫХ МАТРИЦАХ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ОТЖИГЕ

Д.С. Королев<sup>\*)</sup>, А.А. Никольская, К.С. Матюнина, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, Р.Н. Крюков, А.А. Сушков, Д.А. Павлов, П.А. Юнин, Д.И. Тетельбаум  
ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия  
<sup>\*)</sup> e-mail: dmkorolev@phys.unn.ru

Исследования в области физических основ применения ионно-пучковых методов для материалов на основе оксида галлия в настоящее время приобретают популярность в силу значительного усиления интереса к этому материалу и способам контролируемого управления его свойствами. К настоящему времени достаточно активно исследуются процессы дефектообразования в  $Ga_2O_3$ , его радиационной стойкости, а также вопросы легирования данного материала. Нами предлагается использовать ионные пучки для синтеза нанокристаллов (НК)  $Ga_2O_3$  в диэлектрических матрицах путем имплантации ионов фазообразующих элементов – Ga и O с последующим высокотемпературным отжигом. В данной работе приводятся результаты исследования химического состава, структуры и светоизлучающих свойств образцов  $SiO_2/Si$  и  $Al_2O_3/Si$  с ионно-синтезированными НК  $Ga_2O_3$ .

Исследование химического состава образцов показало наличие связей Ga-O сразу после облучения, после отжига их концентрация возрастает с одновременным снижением концентрации элементного галлия. В спектрах фотолюминесценции образцов после отжига при температуре 500 °C появляются полосы в области 400-550 нм, интенсивность которых возрастает при увеличении температуры отжига до 900 °C. Образование НК  $Ga_2O_3$  подтверждено методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифракции.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10233, <https://rscf.ru/project/21-79-10233/>.



СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ P, PF<sub>4</sub> И Хе

А.И. Клевцов<sup>1\*)</sup>, А.И. Стручков<sup>1)</sup>, Е.Д. Федоренко<sup>1)</sup>,  
К.В. Карабешкин<sup>1)</sup>, П.А. Карасев<sup>1)</sup>, А.И. Титов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Политехнический ун-т Петра Великого, СПб, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: klevtsovanton@rambler.ru

Одним из основных приемов в технологии изготовления полупроводниковых приборов является имплантация ионов. Имплантация ионов всегда сопровождается образованием в мишени радиационных дефектов, в том числе и в Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> –материале, перспективном для целого ряда приложений.

Нами исследовалось накопление устойчивых нарушений при облучении  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ионами P и ионами PF<sub>4</sub> с энергиями 40 и 140 кэВ соответственно, а также ионами Хе с энергией 120 кэВ. Эти энергии и плотности потока ионов были подобраны так, что профили генерации первичных смещений совпадали. В качестве примера, некоторые полученные результаты приведены на рис.1.

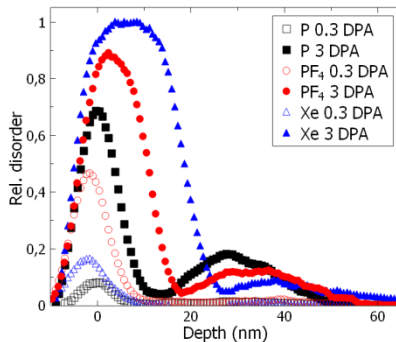


Рис.1 Распределения по глубине относительного разупорядочения  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, облученного ионами P 40 кэВ, PF<sub>4</sub> 140 кэВ и Хе 120 кэВ дозами, указанными на рисунке

Видно, что результирующие распределения дефектов являются бимодальными. Объемный максимум дефектов с ростом дозы сильнее растет для атомарных ионов. Поверхностный максимум растет быстрее для более тяжелых ионов. Однако, накопление повреждений на поверхности драматически возрастает при облучении молекулами, что объясняется увеличением плотности смещений при перекрытии субкаскадов от отдельных атомов молекулы.

Морфология поверхности и структура образцов до и после облучения исследовались методами атомно-силовой микроскопии и дифракции рентгеновских лучей соответственно.

Работа поддержана грантом РФФ № 22-19-00166.

СТРУКТУРА ОБЛУЧЕННЫХ СЛОЕВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТОМОВ БОРА ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ БОРА В  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Д.И. Тетельбаум<sup>1\*</sup>, А.А. Никольская<sup>1</sup>, Д.С. Королев<sup>1</sup>, А.Н. Михайлов<sup>1</sup>, В.Н. Трушин<sup>1</sup>, П.А. Юнин<sup>1,2</sup>, М.Н. Дроздов<sup>2</sup>, Е.В. Окулич<sup>2,3</sup>, В.И. Окулич<sup>3</sup>, А.В. Степанов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>) Университет Лобачевского, Н. Новгород, Россия

<sup>2</sup>) ИФМ РАН, Н. Новгород, Россия

<sup>3</sup>) НИУ филиал РАНХиГС, Н. Новгород, Россия

<sup>4</sup>) Чувашский ГАУ, Чебоксары, Россия

<sup>\*</sup>) e-mail: tetelbaum@phys.unn.ru

Ионная имплантация – ключевой метод при создании полупроводниковых приборов на основе Si, SiC и A<sub>3</sub>B<sub>5</sub>. Однако для сверхширокозонного полупроводника Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ставшего в последние годы актуальным для создания приборов силовой электроники, УФ-детекторов, газовых сенсоров и др. этот метод слабо исследован. В настоящей работе исследованы закономерности ионного легирования  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> бором. Установлено сильное структурное разупорядочение в облученных В<sup>+</sup>, не отожженных образцах, которое снижается по мере отжига. При отжиге с температурой 950 °С концентрационный профиль бора характеризуется наличием двух максимумов, что свидетельствует о его диффузии и сегрегации при его движении в сторону границы между областями с восстановленной и разупорядоченной структурой. При этом атомы бора в основном не замещают вакансии галлия, следовательно, образование твердого раствора замещения Ga<sub>(2-x)</sub>V<sub>x</sub> с большими значениями x затруднено.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-00052, <https://rscf.ru/project/23-79-00052/>.

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В КРЕМНИИ ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ  
СИСТЕМЫ SiO<sub>2</sub>/Si

А.А. Никольская, Д.С. Королев, А.Н. Михайлов, А.А. Сушков, Д.А. Павлов,  
П.А. Юнин, Д.И. Тетельбаум  
Университет Лобачевского, Нижний Новгород, Россия  
\*) e-mail: nikolskaya@nifti.unn.ru

Применение кремния – основного материала современной микроэлектроники в качестве основы для использования в фотоэлектронных устройствах требует повышения его эффективности как излучателя света. Существует много способов решения этой задачи, но они не нашли широкого применения в связи с теми или иными недостатками, среди которых главным является сильное термическое гашение люминесценции и недостаточная ее устойчивость к отжигу. В настоящей работе исследована возможность решения этой проблемы путем ионного облучения Si, покрытого термической пленкой SiO<sub>2</sub> с последующим отжигом при 800 °С, энергия ионов и толщина плёнки выбирались такими, чтобы подавляющее большинство ионов останавливалось в слое SiO<sub>2</sub>. Ранее нами для случаев облучения Kr<sup>+</sup> и другими ионами было установлено формирование в Si на границе с SiO<sub>2</sub> гексагональной фазы 9R-Si. Наблюдаемая при этом линия фотолюминесценции (ФЛ) при ~ 1240 нм приписывалась излучению данной фазы. Однако, дополнительные эксперименты позволили установить, что данное излучение обусловлено центрами, связанными с некоторыми радиационными дефектами в Si. Изучены закономерности этой ФЛ и показаны преимущества данного метода для фотоэлектроники.

Работа выполнена в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Плазмохимическое травление образцов выполнялись в лаборатории диагностики радиационных дефектов в твердотельных наноструктурах ИФМ РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (г/з № 0030-2021-0030).

## ИЗМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛЫХ ЧАСТИЦ $ZnO/SiO_2$ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОНАМИ

А.Н. Дудин<sup>1)</sup>, В.Ю. Юрина<sup>1),\*)</sup>, В.В. Нешименко<sup>1)</sup>, М.М. Михайлов<sup>1),2)</sup>,  
С.А. Юрьев<sup>1),2)</sup>, А.Н. Лапин<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Амурский государственный университет, Благовещенск, Россия

<sup>2)</sup> Томский университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

\*) e-mail: viktoriyay-09@mail.ru

Представлены результаты исследования оптических свойств и радиационной стойкости к воздействию электронов покрытий на основе кремнийорганического лака и порошков-пигментов из двухслойных сферических частиц с внутренним слоем из оксида цинка и внешним из диоксида кремния микронных размеров.

Полученные спектры диффузного отражения ( $\rho$ ) позволили установить, что исследуемые покрытия на основе двухслойных полых частиц  $ZnO/SiO_2$  (КО-Z/S) имеют высокие значения коэффициента отражения во всем спектральном диапазоне (0.2-2.5 мкм) по сравнению с покрытиями на основе сплошных объемных микрочастиц  $ZnO$  (КО-Z). Радиационную стойкость исследуемых полых частиц оценивали по разностным спектрам диффузного отражения ( $\Delta\rho_E$ ). Анализировали значения интегрального коэффициента поглощения солнечного поглощения  $\alpha_s$ .

Из полученных спектров  $\Delta\rho_E$  следует, что при воздействии электронами с энергией 30 кэВ флюенсом  $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  интенсивность полос наведенного поглощения

в покрытиях КО-Z/S меньше, чем в покрытиях на основе КО-Z, а расчет изменений значений коэффициента поглощения  $\alpha_s$  показал увеличение радиационной стойкости покрытий КО-Z/S по сравнению с КО-Z на 38 %.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № 122082600014-6 (FZMU-2022-0007).

## СОЗДАНИЕ НИЗКООМНОГО КОНТАКТА НА ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ

В.Н. Арустамов<sup>1\*)</sup>, М.В. Кремков<sup>1)</sup>, И.Х. Худайкулов<sup>1)</sup>, И.О. Косимов<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова,  
Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 100125

<sup>\*)</sup> e-mail: khudaykulov@iplt.uz

В настоящее время альтернативные источники электрической энергии, как основы зеленой энергетики и уменьшения использования углеводородных источников энергии, являются одним из наиболее перспективных направлений разработок и применения разнообразных полупроводниковых материалов и фотоэлектрических преобразователей на их основе [1].

В данной работе представлено тонкое контактное покрытие на поверхности кристалла кремния нанесенное методом магнетронного распыления и представлен анализ полученного контактного материала.

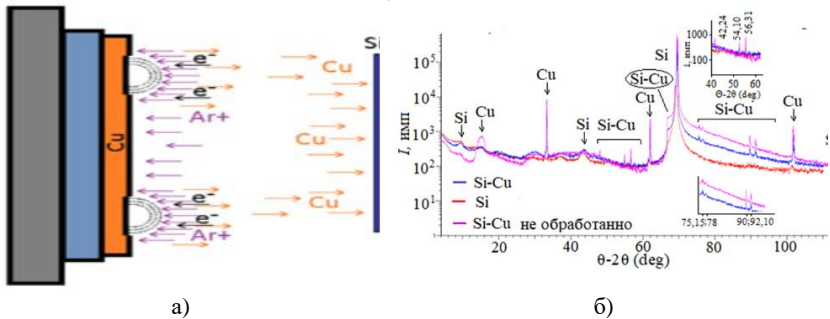


Рис.1. Процесс нанесения контакта с поверхностью кристалла кремния; а) механизм нанесения контакта, б) дифрактограмма полученного образца.

Полученные результаты показали, что создание омического контакта к кремниевому поликристаллу, путем нанесения методом магнетронного ионного распыления тонкого слоя меди, обладающего высокой проводимостью, при толщине порядка 3-4 мкм, уменьшает электрическое сопротивление контакта Cu – Si.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Демидов А.А., Рыбалка С.Б. Современные и перспективные полупроводниковые материалы для микроэлектроники следующего десятилетия (2020-2030 гг.). // Прикладная математика и физика, 2021, Том 53, № 1, С. 53-72. DOI 10.52575/2687-0959-2021-53-1-53-72.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКООМНОГО КОНТАКТА, ПОЛУЧЕННОГО МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

В.Н. Арустамов<sup>1,\*</sup>, Б.Р. Кахрамонов<sup>1</sup>, М.В. Кремков<sup>1</sup>, И.Х. Худайкулов<sup>1</sup>,  
В.П. Харьяков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт ионно-плазменных и лазерных технологий  
им. У.А. Арифова, Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 100125

<sup>\*</sup> e-mail: khudaykulov@iplt.uz

В настоящее время изучение физических свойств материалов особенно важно для рационального использования зеленой энергии и экономии энергоресурсов.

В данной работе исследованы физические свойства низкоомного медного контакта, полученного методом магнетронного напыления.

Сопротивление контакта  $\rho_k$  медного покрытия, нанесенного на поверхность кремния в малых концентрациях, определяется выражением из работы [1], как:

$$\rho_k = \frac{k}{eAT} e^{\frac{e\phi}{kT}} \quad (1)$$

где  $A$  - постоянная Ричардсона,  $\phi$  - высота потенциального барьера металл - полупроводник,  $k$  - постоянная Больцмана.

Из выражения (1) следует, что сопротивление контактного слоя на поверхности кремния сильно связано с температурой поверхности, а температура поверхности напрямую зависит от толщины нанесенного слоя.

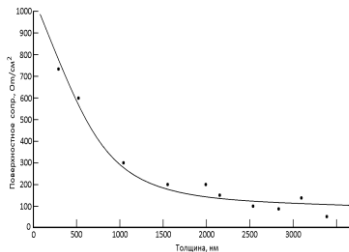


Рис.1. Зависимость поверхностного сопротивления контактного покрытия меди от толщины нанесенного слоя.

Таким образом, толщина контактного слоя меди 1,5 мкм является оптимальной с точки зрения получения минимального значения его поверхностного сопротивления.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Басанец В.В., Слепокуров В.С., Шинкаренко В.В., Кудрик Р.Я., Кудрик Я.Я. Исследование удельного сопротивления омических контактов Au—Ti—Pd—n-Si для лавинно-пролетных диодов. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2015, № 1, С. 33-37. DOI: 10.15222/ТКЕА2015.1.33

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КРУГЛОГО ПРУТКА ПРИ ДВИЖЕНИИ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА

Б.Р. Кахрамонов <sup>1\*)</sup>, В.Н.Арустамов <sup>1)</sup>, В.П. Харьяков<sup>1)</sup>,  
И.Х. Худайкулов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Институт ионно-плазменных и лазерных технологий  
им. У.А. Арифова, Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 100125  
<sup>\*)</sup> e-mail: khudaykulov@iplt.uz

Использование вакуумно-дугового разряда для очистки модификации свойств поверхности металлических изделий имеет ряд существенных преимуществ, как экологичность неограниченные энергетические возможности.

Рассматривая КП вакуумной дуги, характеризующиеся высокой температурой плазмы до  $5 \cdot 10^3$  °С и скоростью перемещения до  $10^4$  см/сек, как точечные источники высокой мощности, в работе произведен расчёт создаваемых им и температурных полей в приповерхностном слое металлического прутка катода, приводящее к изменению поверхностных и приповерхностных слоев обрабатываемого изделия. При расчётах был использован метод источников теории теплопроводности. Решая задачу методом функции точечного источника, выражение имеем, что

$$T(x, y, \tau) = \frac{Q}{\alpha \rho l \sqrt{\pi}} \int_0^\tau \left( \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \cos \frac{2k\pi}{l} y * e^{-\left(\frac{2ak\pi}{l}\right)^2 (\tau - \theta)} \right) * \frac{e^{-\frac{(x-v_0\theta)^2}{4a^2(\tau-\theta)}}}{\sqrt{(\tau-\theta)}} d\theta \quad (1).$$

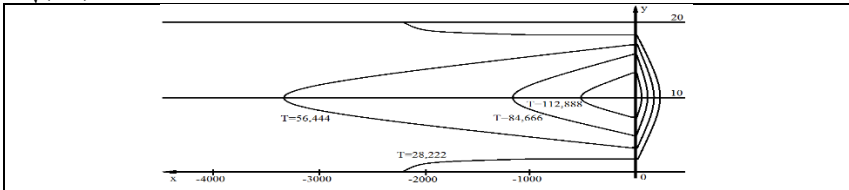


Рис.1 Изотерм при движении точечного источника по полубесконечной полосе из стали 45 со скоростью  $10^4$  см/с, мощностью  $10^4$  кал/с

Сравнение полученных расчетных результатов с экспериментальными данными позволяет, разработать оптимальные режимы обработки металлических изделий и выбрать оптимальные условия технологического процесса.

## ХАРАКТЕРИСТИКА И МОРФОЛОГИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА

Б.Р. Кахрамонов <sup>1\*)</sup>, В.Н.Арустамов <sup>1)</sup>, В.П. Харьяков<sup>1)</sup>, И.Х.  
Худайкулов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова,  
Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 100125

<sup>\*)</sup> e-mail: khudaykulov@iplt.uz

Актуальной задачей является получение функциональных износостойких твердосплавных покрытий с тугоплавкими металлами, их карбидами и наночастицами, используемых для упрочнения рабочих поверхностей деталей машин и механизмов.

В работе исследовались характеристики и морфология нанесенного вакуумно-дуговым методом покрытия нитрида титана на поверхность образца.

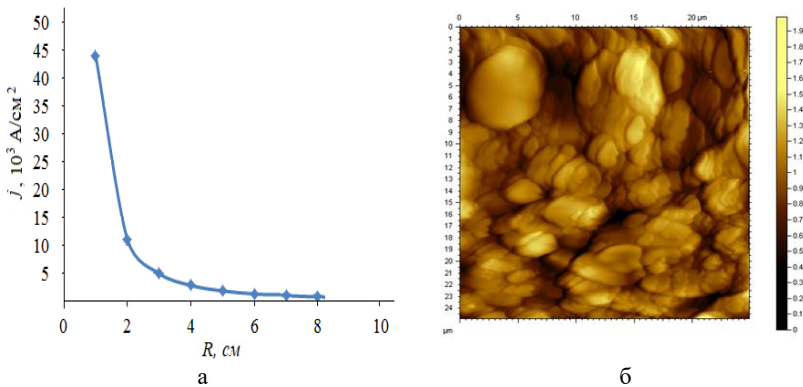


Рис.1. Характеристика и морфология медного образца: а) зависимость плотности тока от расстояния в дуговом разряде; б) морфология поверхности образца.

Полученные образцы с нанесенным покрытием нитрида титана вакуумно-дуговым методом показывают, что структура нанесенного покрытия существенно зависит от расстояния расположения образца к поверхности катода вакуумного дугового источника. На рисунке 1 представлена морфология сечения нанесенного покрытия.



ИОННО-ЛУЧЕВОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСШИХ  
ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

Н.В. Алов

МГУ им. М.В. Ломоносова, НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына,

Москва, Россия

e-mail: n\_alov@mail.ru

В докладе представлены результаты исследования процессов ионно-лучевого восстановления (ИЛВ) поверхности высших оксидов металлов на глубине 3-5 нм. В качестве объектов исследования выбраны оксиды тугоплавких металлов: молибдена, вольфрама, ниобия и тантала. Облучение поверхности оксидов проводили ионами инертных газов – аргона и гелия, а также ионами химически активного газа – молекулярного кислорода в широком диапазоне энергий (1-5 кэВ) и доз ( $10^{15}$ - $10^{18}$  см<sup>-2</sup>) при комнатной температуре. Определение элементного состава и степени окисления поверхности проводили методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Все исследования выполнены *in situ* в условиях высокого вакуума ( $10^{-6}$  Па) на электронном спектрометре *Leybold LHS-10* (Германия). Методом РФЭС установлено, что ИЛВ поверхности высших оксидов наблюдается как при облучении ионами инертных газов, так и ионами химически активного газа. Эффективность ИЛВ зависит от многих факторов: типа оксида, вида ионов, дозы и энергии ионного облучения. При этом образуются промежуточные и низшие оксиды, а в ряде случаев происходит металлизация поверхности на уровне 1-2 нм. Общая тенденция при ИЛВ поверхности оксидов обусловлена их радиационной устойчивостью. Показано, что при облучении поверхности ионами аргона ИЛВ поверхности оксидов убывает в следующей последовательности: вольфрам, тантал, молибден, ниобий. В этом же ряду убывает степень металлизации поверхности оксидов. Обсуждаются механизмы ИЛВ поверхности высших оксидов металлов по данным *in situ* экспериментов по определению состава поверхности методом РФЭС.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ИОНИЗАЦИИ ИНСЕКТИЦИДА ИМИДАКЛОПРИДА

Ш.М. Ахмедов\*, Ш.Дж. Ахунов, Д.Т. Усманов  
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АН РУз,  
Ташкент, Узбекистан,  
\*e-mail: sherzod\_in@mail.ru

Пестициды широко используются в сельском хозяйстве и садоводстве, с помощью которых можно повысить урожайность растений и защитить от различных вредоносных организмов. Однако, пестициды обладают способностью мигрировать в природных условиях, длительное время сохраняться в пищевых продуктах. В связи с этим, изучения накопления пестицидов и их метаболитов в пищевых цепочках, а также контроль качества продуктов питания является одной из актуальных проблем современного мира. При поиске решения подобных задач целесообразно использовать метод поверхностной ионизации (ПИ), основанный на явлении поверхностной ионизации. Это связано тем, что с помощью этого метода можно разработать эффективные методы ПИ для определения следовых количеств веществ, и таким образом, оценить физические параметры вещества.

В связи с этим в данной работе были изучены закономерности ПИ инсектицида имидаклоприда ( $C_9H_{10}ClN_5O_2$ ) в окисленном и неокисленном-чистом вольфрамовом термоэмиттере. Исследования проводились на статическом магнитном масс-спектрометре М-1201В, модернизированный для работы по методу ПИ [1]. Результаты исследования показывают, что количество ионных линий в масс-спектрах, полученных на чистом металле, меньше, чем количество линий в масс-спектре, полученных на окисленном эмиттере. Однако, в масс-спектрах, полученных на чистом металле, ионные линии  $(M-nH)^+$  не наблюдались. Анализ полученных результатов показал, что это разница связана с работой выхода и каталитической активностью поверхностей окисленных и неокисленных эмиттеров.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Б.Ш.Касимов, Ш.Дж.Ахунов, Ш.М. Ахмедов, Д.Т. Усманов. // Узбекский физический журнал, Том 23, №1, С.75-81, 2021.

ИССЛЕДОВАНИЯ РАССЕЙЯНИЯ ИОНОВ  $\text{Ne}^+$  С ПОВЕРХНОСТЬЮ  $\text{SiO}_2(001)\langle 110 \rangle$  ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

У.О. Кутлиев<sup>\*)</sup>, А.С. Аширов, М.К. Каримов  
Ургенчский госуниверситет, Ургенч, Узбекистан  
<sup>\*)</sup> e-mail: uchkun@mail.ru

Применение процесса рассеяния ионов для практических целей, показывает, что рассеяние лёгких ионов, рассматриваемое в рамках парных упругих столкновений, может быть использовано при изучении поверхностных слоёв многокомпонентных материалов или адсорбции чужеродных атомов на поверхности твёрдого тела. В связи с этим здесь обсуждаем результаты теоретических исследований рассеяния ионов поверхностью  $\text{SiO}_2$ . На рис.1 представлена зависимость энергии рассеянных ионов  $\text{Ne}^+$  от прицельной точки-  $E_i(L)$  с поверхностью  $\text{SiO}_2(001)\langle 110 \rangle$  при  $E_0=1$  кэВ и углов падения  $\psi = 1^\circ - 11^\circ$ . Видно, что при  $\psi=10$  наблюдается потеря энергии вблизи атомной цепочки и дна полуканала. Это свидетельствует, что падающая частица взаимодействует только с этими атомами. С увеличением угла скольжения энергия рассеянного иона уменьшается, особенно на стенке полуканала между атомами Si-O и O-Si. При  $\psi=11^\circ$  до и после атома кислорода ион проникает глубже монокристалла, и энергия рассеянного иона становится малой.

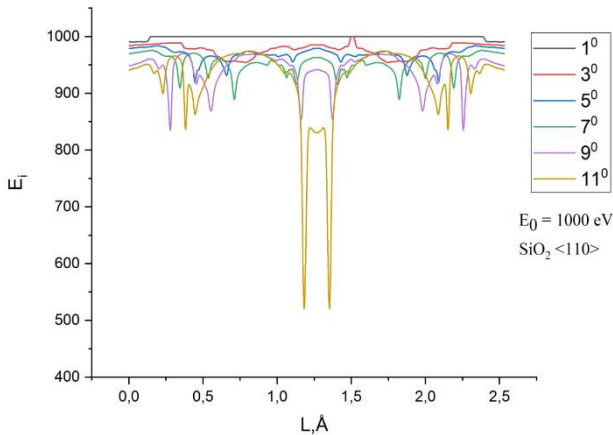


Рис.1. Зависимость  $E_i(L)$  рассеянных ионов  $\text{Ne}^+$  с поверхностью  $\text{SiO}_2(001)\langle 110 \rangle$  при  $E_0=1$  кэВ и углов падения  $\psi = 1^\circ - 11^\circ$ .

ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЯ, СОДЕРЖАЩЕГО MoSi<sub>2</sub> ДЛЯ  
ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ ИК СЕНСОРОВ

С.М. Барайшук<sup>\*)</sup>, В.К Долгий, А.А. Шевченко  
Белорусский государственный аграрный технический университет,  
Минск, Беларусь

<sup>\*)</sup> e-mail: bear\_s@rambler.ru

Конструкции, состав и технология получения тонкопленочных ИК-излучателей на основе MoSi<sub>2</sub>, при создании оптических газоанализаторов, построенных на принципе без дисперсионной ИК спектроскопии крайне важны [1].

Молибден осаждался на пластины монокристаллического кремния (111) Si, без напряжения, а потом в условиях ассистирования собственными ионами при ускоряющих напряжениях 5 кВ, ранее нами изучалась структура поверхности полученных таким образом покрытий [2]. Послойный элементный анализ образцов, изучали методом резерфордского обратного рассеяния в сочетании с моделированием экспериментальных спектров.

Распределение молибдена в покрытии составляет 35-45 ат. % по всей толщине покрытия с уменьшением до 35-37 ат. % к границе покрытие – подложка. При времени облучения 6 ч толщина покрытия составляет 240 нм. Средняя скорость роста осаждаемого металлосодержащего покрытия на кремнии равна 0,5 нм/мин. Как было показано ранее [3], для аналогичных систем, при осаждении Mo покрытий на подложке формируется слой, содержащий области скопления силицидов и оксида Mo, размер которых составляет от 5 до 10 нм. что позволяет предложить использование таких систем кв качестве ИК излучателя.

Работа выполнена при поддержке министерства образования Республики Беларусь (№ ГР 20211250).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. J. Mao, D. Siyu, Y. Li, S. Li, F. Liu, X. Zeng, X.Cheng // *Surface & Coatings Technology*, 2019, №358, P. 873-878.
2. С. М. Барайшук, А.И. Туравец, Долгий В.К. // «ЭПОХА НАУКИ», 2020, №23(2020), С. 181 –186
3. I. Tashlykov, O. Mikhalkovich, S. Baraishuk, P. Zukowski // *Acta Physica Polonica*, 2014, Vol. 125, No. 6, P. 1306-1308.

## ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ В СТЕКЛАХ

О.А. Подсвиров<sup>1,2\*)</sup>, С.А. Шестаков<sup>1)</sup>, В.В. Журихина<sup>1,2)</sup><sup>1)</sup>С-Петербургский Гос.Политех.Университет, СПб, РФ<sup>2)</sup>Академический Университет, СПб, РФ

\*) e-mail: olegpodsvir@mail. ru

В настоящей работе представлены экспериментальное исследование создания оптической нелинейности второго порядка в приповерхностном слое силикатных стекол с помощью облучения электронами средних энергий.

Силикатные стекла являются очень привлекательным материалом для оптических изделий благодаря их небольшой стоимости, прозрачности, низким оптическим потерям и простоте изготовления оптических элементов на их основе. Поэтому их применение в областях, в которых в настоящее время используются оптически нелинейные кристаллы, представляет определенный интерес. Однако, такие стекла оптически изотропны, в них нет нелинейно-оптических и электро-оптических эффектов второго порядка, таких как генерация второй гармоники и электрооптический эффект Поггеля. Ранее был обнаружен эффект снятия оптической изотропии в стеклах при их облучении электронами (e-beam poling). Это объясняется нарушением их центральной симметрии в связи с появлением «замороженного» под поверхностью электрического заряда, создающего статическое электрическое поле, которое и создает оптическую нелинейность второго порядка. Однако до сих пор подробных экспериментальных исследований и моделирований, возникающих при этом процессов проведено не было.

В работе изучалось воздействие на барий-содержащие стекла БФ16 электронов с энергиями от 4 до 32 кэВ и дозами от 0,2 до 40 мкКл/см<sup>2</sup>. Полученные зависимости показывают появления относительно сильного нелинейно-оптического эффекта второго порядка, приводящего к появлению второй гармоники лазерного луча. Проведенное моделирование и вычисления позволяют описать наблюдаемое явление и выбрать наиболее вероятный его механизм.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОПЛЕНОК NiSi<sub>2</sub>

Н.М. Мустафоева<sup>1\*)</sup>, А.К. Ташатов<sup>2)</sup>, Б.Е. Умирзаков<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Каршинский институт ирригации и агротехнологий, 180003  
г. Карши, Узбекистан

<sup>2)</sup> Каршинский государственный университет, 180003  
г. Карши, Узбекистан

\*) e-mail: mustafoyevan@gmail.com

На рис. 1 приведена зависимость интенсивности проходящего света  $I$  от энергии фотонов  $h\nu$  для Si с нанопленкой NiSi<sub>2</sub> с  $h = 50 \text{ \AA}$  и  $h = 200 \text{ \AA}$ . В случае Si с пленкой NiSi<sub>2</sub> толщиной  $50 \text{ \AA}$ , резкое уменьшение интенсивности проходящего света наблюдается при двух значениях  $h\nu$ . Уменьшение  $I$  начиная с  $h\nu = 0,5 \text{ эВ}$  связано с поглощением света на участках покрытых nanoостровками NiSi<sub>2</sub>, а уменьшение  $I$  с  $h\nu = 1 \text{ эВ}$  – на участках, не закрытых NiSi<sub>2</sub>.

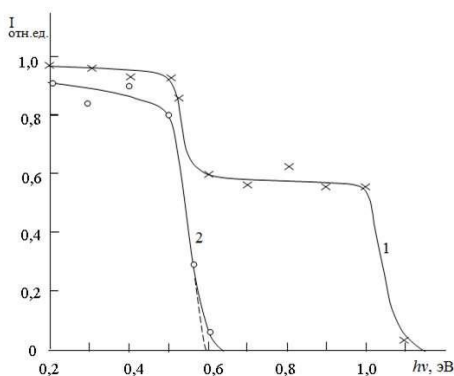


Рис. 1. Зависимость интенсивности  $I$  проходящего света от энергии фотонов для Si с нанопленкой NiSi<sub>2</sub> толщиной  $h$ , Å: 1 – 50, 2 – 200

Экстраполяция этих кривых к оси  $h\nu$  показывает, что значение  $E_g$  для NiSi<sub>2</sub>  $\sim 0,6 \text{ эВ}$ , а для Si –  $\sim 1,1 \text{ эВ}$ . В случае сплошной пленки NiSi<sub>2</sub> значение  $I$  резко уменьшается до нуля в интервале  $h\nu = 0,5 - 0,6 \text{ эВ}$ .

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А.К. Tashatov, N.M. Mustafоеva // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2020, Vol.14, No 1, pp. 81-84.
2. B.E. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova, A.K. Tashatov, N.M. Mustafоеva, D.M. Muradkabilov // Semiconductors, 2020, 54(11), стр. 1424–1429

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ НА  
ДЕФЕКТНУЮ СТРУКТУРУ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СПЛАВОВ  
СИСТЕМЫ Zr-Nb-N

М.А. Кругляков<sup>1,2)</sup>, Е.Н. Степанова<sup>1,2\*)</sup>, Г.П. Грабовецкая<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

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

<sup>2)</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия

\*) e-mail: enstepanova@tpu.ru

Проведены исследования влияния облучения импульсным электронным пучком в режиме отсутствия плавления поверхности на образование дефектов в приповерхностном слое сплава Zr-1 мас.% Nb с содержанием водорода 0,0016 и 0,21 мас.% (далее сплавы Zr-1Nb и Zr-1Nb-0,21H, соответственно).

Методами позитронной спектроскопии установлено, что в результате облучения импульсным электронным пучком в приповерхностном слое сплава Zr-1Nb кроме дислокаций образуются дефекты типа «вакансия-примесь». В приповерхностном слое сплава Zr-1Nb-0,21H наряду с дислокациями и дефектами типа «вакансия-примесь» формируются сложные водород-вакансионные комплексы, отсутствующие в исходном наводороженном состоянии. Изучено влияние дефектной структуры на механическую прочность приповерхностного слоя.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-00156.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИОННОЙ  
СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ  
РЕШЕТКИ

И.В. Кузив

Северный (Арктический) федеральный университет  
им. М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия  
e-mail: i-kuziv@yandex.ru

В исследованиях кристаллов важное значение имеет дефектоскопия, поскольку дефекты, образованные на уровне кристаллической решетки, кардинальным образом сказываются на физических свойствах материалов. Уникальным инструментом для анализа дефектов кристаллической решетки является позитронная аннигиляционная спектроскопия (ПАС) [1], которая позволяет не только обнаружить такие дефекты как вакансии, кластеры вакансий, дислокации и т.д., но и определить распределение дефектов по глубине.

В настоящей работе представлены результаты применения ПАС для анализа дефектов кристаллической решетки на примере алмазных пластин, выращенных методом НТНР. Для образования дефектов образцы облучались пучками электронов. Для анализа дефектов использовались методы доплеровского уширения аннигиляционной линии и определение времени жизни позитронов. В работе показано, что при облучении электронами (3 МэВ,  $1 \times 10^{18} \text{e}^-/\text{cm}^2$ ) происходит образование дефектов вакансионного типа, также представлен профиль распределения таких дефектов на глубине до 2,4 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. I. Prochazka // Positron Annihilation Spectroscopy, Materials Structure, 2001, 8, 55-60



## ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА

М.В. Жидков<sup>2)</sup>, А.Е. Лигачев<sup>1\*)</sup>, Г.В. Потемкин<sup>3)</sup>, Г.Е. Ремнев<sup>3)</sup><sup>1)</sup>ИОФ РАН, Москва, Россия<sup>1)</sup>ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черноголовка, Россия<sup>3)</sup>НИУ ТПУ, Томск, Россия

\*) carbin@yandex.ru

Методами растровой электронной микроскопии (дифракция обратно-рассеянных электронов) и рентгенофазового анализа исследовано влияние мощного импульсного ионного пучка (МИИП) на фазовый состав приповерхностных слоев нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Поверхностную обработку МИИП проводили на ускорителе ТЕМП-4М (поток ионов  $C^{n+}$  при энергии однозарядных ионов 250 кэВ и длительности импульса ~100 нс, с примесью ионов водорода ~10-20%) [1]. Плотность энергии одиночного импульса составляла 1 и 3 Дж/см<sup>2</sup>. Число импульсов варьировалось от 1 до 50. В качестве мишеней использовались образцы стали после пластической деформации с различным соотношением фаз аустенит ( $\gamma$ -Fe)/феррит ( $\alpha$ -Fe).

Показано, что в результате воздействия МИИП (1 и 3 Дж/см<sup>2</sup>) в приповерхностных слоях стали имеют место фазовые превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$  и  $\alpha \rightarrow \gamma$ . После 1 импульса сталь является двухфазной независимо от исходного фазового состава стали. Дальнейшее увеличение числа импульсов снижает долю  $\alpha$ -Fe в приповерхностном слое. При 50 импульсах воздействия приповерхностный слой стали состоит только из аустенитных зерен. Для всех использованных параметров обработки структурно-фазовое состояние кратеров не отличалось от структурно-фазового состояния свободных от кратеров облученных участков поверхностей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Remnev G. E., Shulov V. A. // Laser and Particle Beams, 1993, 11, 707–731.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ КВАЗИДВУМЕРНЫХ ОБРАЗЦОВ MoS<sub>2</sub>  
ПЛАЗМОЙ N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>

Д.Е. Мележенко<sup>1,2\*</sup>, Д.В. Лопаев<sup>1</sup>, А.И. Зотович<sup>1</sup>, С.А. Хлебников<sup>1</sup>,  
А.А. Соловых<sup>1,2</sup>, Ю.А. Манкелевич<sup>2</sup>, Л.С. Новиков<sup>2</sup>, Е.Н. Воронина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>) Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>) НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына  
МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*) e-mail: dmelezhenko2301@gmail.com

Квазидвумерный дисульфид молибдена рассматривается как один из наиболее перспективных полупроводниковых материалов для создания элементов наноэлектроники благодаря уникальному сочетанию механических, электрических и оптических свойств, а также возможностью направленного изменения этих свойств путем различных внешних воздействий, в том числе за счет функционализации поверхности [1]. Поэтому для создания надежной технологии плазменной обработки подобных ультратонких пленок необходим тщательных анализ эффектов, возникающих в них под действием радикалов и ионов плазмы.

В докладе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования воздействия плазмы различного состава (N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>) на квазидвумерные образцы MoS<sub>2</sub>. Показано, что обработка атомами вызывает модификацию тонкого приповерхностного слоя, а воздействие ионов даже низкой энергии (до 40 эВ) приводит к частичному удалению верхних слоев, способствуя более интенсивному разрушению пленок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00178.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Zh.M. Wang, MoS<sub>2</sub>. Materials, Physics, and Devices, Springer, 2014, 296 p.
2. Д.Е. Мележенко, Д.В. Лопаев, А.И. Зотович, Е.Н. Воронина // Письма в ЖТФ, 2022, т. 48, № 22, с.28.

## МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ МЕДИ

М.А. Каримов<sup>1)</sup>, Ф.Д. Акбарова<sup>2)</sup>, С.У. Туропова<sup>3)</sup>, Р.Джаббарганов<sup>4)</sup>,  
У.Б. Шаропов<sup>5\*)</sup>

<sup>1)</sup>Ташкентский государственный технический университет  
им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

<sup>2)</sup>Физико-технический институт, АНРУз, Ташкент, Узбекистан

<sup>3)</sup> Институт материаловедения, АНРУз, Ташкент, Узбекистан

<sup>4)</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АНРУз,  
Ташкент, Узбекистан

<sup>5)</sup> Национальный исследовательский институт возобновляемых  
источников энергии, Ташкент, Узбекистан

\*) e-mail: utkirstar@gmail.com

В настоящее время уже хорошо известно, что загрязнение поверхности твердого тела в вакууме может осуществляться как со стороны вакуума, т.е. молекулами остаточных газов, так и изнутри образца за счет диффузии объемных примесей к поверхности. Элементы, содержащиеся в объеме металла в качестве малых примесей с увеличением его температуры диффундируют на поверхность и вступает в химические реакции как с частицами сорбированных газов, так и с поверхностными атомами самого металла, а также с образовавшимися ранее молекулами поверхностных химических соединений. Методом масс-спектрометрии вторичных отрицательных ионов был проведен цикл работ по исследованию влияния объемных примесей на выход отрицательно-ионных кластеров при бомбардировке медной мишени ионами цезия.

Масс-спектр отрицательно-ионного распыления меди, зафиксированный при низких температурах (до 700°C), показывает, что состав его чрезвычайно богат и определяется составом и количеством сорбированных молекул. В состав пленки химических соединений на поверхности меди входят гидриды, окислы и карбиды меди ( $\text{CuH}^-$ ,  $\text{CuO}^-$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}^-$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}^{2-}$ ,  $\text{CuC}^-$ ,  $\text{CuC}_2^-$ ,  $\text{Cu}_2\text{C}^-$ ,  $\text{Cu}_2\text{C}_2^-$  и т.д.). В числе сорбированных частиц наблюдаются атомы водорода, молекулы и атомы кислорода и различных углеводородов и углеродных кластеров.

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ПАЛЛАДИЙ-СЕРЕБРО-ВОДОРОД

Л.Ю. Немирович-Данченко<sup>1,2)</sup>, Л.А. Святкин<sup>1)</sup>, И.П.Чернов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> НИ ТПУ, г. Томск, Россия

<sup>2)</sup> ТУСУР, г. Томск, Россия

\*) e-mail: ndlyu@tpu.ru

Металлические мембраны из сплавов Pd широко используются для получения сверхчистого водорода. В чистом палладии при насыщении водородом происходит структурно-фазовый переход, способствующий водородному охрупчиванию мембран. Особый научный и практический интерес представляют сплавы палладия с серебром, в которых при их насыщении водородом фазовые переходы и, соответственно, охрупчивание не наблюдаются. В настоящей работе было изучено из первых принципов плотность электронных состояний и распределение электронной плотности, в частности, перенос заряда между атомами палладия, серебра и водорода в соединениях  $Pd_{1-x}Ag_xH_y$ , где  $x$  и  $y$  принимают значения 0, 0,25, 0,50, 0,75 и 1,0. С этой целью были рассчитаны распределение электронной плотности, объёмы по методу Бадера, занимаемые атомами H, Pd и Ag в соединениях  $Pd_{1-x}Ag_xH_y$ , и электронные заряды в этих объёмах. Все расчеты выполнялись в рамках теории функционала электронной плотности методом псевдопотенциала, реализованным в пакете программ ABINIT.

Показано, что в рассмотренных соединениях  $Pd_{1-x}Ag_xH_y$  увеличение концентрации серебра  $x$  приводит к большему переносу электронного заряда от атомов серебра преимущественно к атомам водорода. Установлено, что с ростом концентрации серебра увеличиваются области с пониженной электронной плотностью между атомами (плотность электронов в этих областях меньше 0,02 электрон/Бор<sup>3</sup>), что указывает на ослабление металлической составляющей связей палладий-серебро и металл-водород. Выявлено, что в рассмотренных соединениях  $Pd_{1-x}Ag_xH_y$  в  $d$  зоне серебра в области энергий от 5,5 до 3 эВ ниже уровня Ферми присутствует повышенная плотность электронных  $s$  состояний водорода, что, по-видимому, и приводит к неустойчивости системы палладий-серебро-водород при высоких концентрациях водорода и серебра.

ИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> КРЕМНИЕМ

А.А. Никольская<sup>1\*)</sup>, Д.С. Королев<sup>1)</sup>, А.Н. Михайлов<sup>1)</sup>, А.В. Кудрин<sup>1)</sup>,  
В.Н. Трушин<sup>1)</sup>, М.Н. Дроздов<sup>2)</sup>, А.А. Конаков<sup>1)</sup>, А.А. Ревин<sup>1)</sup>,  
Д.И. Тетельбаум<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Университет Лобачевского, Н. Новгород, Россия

<sup>2)</sup> ИФМ РАН, Н. Новгород, Россия

\*) e-mail: nikolskaya@nifti.unn.ru

Оксид галлия – один из наиболее перспективных материалов для будущего поколения микроэлектронных приборов, благодаря большой ширине запрещенной зоны (~ 5 эВ), разработанной технологии выращивания слитков большого диаметра, высокой радиационной и химической стойкости и др. Однако, метод ионной имплантации применительно к этому полупроводнику еще мало изучен. В настоящей работе выполнено систематическое исследование закономерностей ионной имплантации кремния в монокристаллы полуизолирующего  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с двумя ориентациями поверхности. Изучен процесс активации имплантированной примеси Si (являющейся мелким донором) при постимплантационном отжиге. Установлено сложное поведение слоевой концентрации носителей в зависимости от дозы, температуры отжига и ориентации поверхности образцов. Для ориентации (010) легирование кремнием оказалось, как правило, не эффективным вследствие сильной аудиффузии при отжиге, а для ориентации (-201) при определенных условиях может существенно превосходить слоевую концентрацию атомов Si. При этом проводимость, судя по температурной зависимости концентрации и подвижности носителей, имеет «металлический» характер. Теоретические расчеты подвижности и ее температурной зависимости, основанные на модели перекрытия примесной зоны и зоны проводимости, с учетом рассеяния на нейтральных центрах, показали удовлетворительное соответствие с экспериментальными данными.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-00052, <https://rscf.ru/project/23-79-00052/>.

СИНТЕЗ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОР С НЕКРУГОВЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ  
СЕЧЕНИЕМ ПРИ ПОМОЩИ ОБЛУЧЕНИЯ ОЛИВИНА БЫСТРЫМИ  
ТЯЖЁЛЫМИ ИОНАМИ

С.А. Горбунов<sup>1\*)</sup>, М.В. Горшенков<sup>2)</sup>, П.А. Бабаев<sup>1)</sup>, А.Е. Волков<sup>1)</sup>,  
Р.А. Воронков<sup>1)</sup>, Г.В. Калинина<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской Академии Наук,  
Москва, Россия

<sup>2)</sup> Национальный исследовательский технологический университет  
"МИСиС", Москва, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: s.a.gorbunov@mail.ru

Химическое травление материалов, облучённых быстрыми тяжёлыми ионами (БТИ,  $E > 1 \text{ МэВ/нукл.}$ ,  $M > 20 \text{ а.е.м.}$ ), является перспективным инструментом для производства полимерных фильтров, нанопроволок и нанотрубок, нано- и микроструктурированных плёнок [1] и поверхностей [2].

Однако, как правило, в этих технологиях используются изотропные материалы, например, полимеры и стёкла, что ограничивает форму полученных нанопор круговым поперечным сечением. Между тем, нанопоры с полигональными поперечными сечениями также представляют интерес [3-5].

В работе мы исследовали возможность синтеза наноразмерных пор с некруговым поперечным сечением в оливине.

Образцы были подготовлены последовательной шлифовкой алмазной пастой и коллоидным кремнием, облучены на ускорителе GSI (Дармштадт), и протравлены с использованием WN-раствора [6]. Полученная поверхность образцов была исследована методом атомно-силовой микроскопии.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. F. F. Komarov, // *Physics-Uspekhi*, 2017, 60, № 5, 435.
2. E. P. Kozhina, // *Appl. Sci.*, 2021, 11, № 4, 1375.
3. Bruschi, L., et al., // *Langmuir*, 2018, 34, № 1, 106.
4. Wu, K., et al., // *Chem. Eng. J.*, 2015, 281, № 813.
5. Prakash, S., et al., // *J. Micromechanics Microengineering*, 2012, 22, № 6, 067002.
6. Alexeev, V., et al., // *Astrophys. J.*, 2016, 829, № 2, 120.

АНАЛИЗ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШЕГО  
СПЛАВА Al–Mg–Li–Sc–Zr МЕТОДОМ МГНОВЕННЫХ ЯДЕРНЫХ  
РЕАКЦИЙ ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА

И.А. Столяр<sup>1\*)</sup>, В.Г. Шепелевич<sup>1)</sup>, И.И. Ташлыкова-Бушкевич<sup>2)</sup>,  
E. Wendler<sup>3)</sup>, R. Wu<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский госуниверситет, Минск, Беларусь,

<sup>2)</sup> Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь,

<sup>3)</sup> Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena, Germany

<sup>4)</sup> Harbin Engineering University, Harbin, China

<sup>\*)</sup> e-mail: uyluana@gmail.com

Промышленные алюминий-литиевые сплавы являются высоко востребованными материалами в перспективных разработках авиакосмической промышленности, поскольку за счёт легирования литием они демонстрируют высокую удельную прочность и значительно уменьшенную плотность по сравнению с другими алюминиевыми сплавами. Однако в процессе термической обработки на поверхности сплавов формируются оксиды, присутствие которых ограничивает область использования материалов и, следовательно, требуется изучение влияния условий термообработки на диффузию лития в образцах в зависимости от метода их получения. В настоящей работе исследовано перераспределение лития в приповерхностных слоях быстрозатвердевших фольг промышленного сплава 1421 (Al–5,8% Mg–8,1% Li–0,03% Zr–0,11% Sc (ат.%) в процессе изотермического отжига. Был применен метод мгновенных ядерных реакций с использованием ядерной реакции.

${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$  при облучении образцов ускоренными протонами с энергией 1,4 МэВ. Обнаружено, что на начальном этапе высокотемпературного отжига фольг наблюдается стадия обогащения тонких приповерхностных слоев литием. Степень обогащения/обеднения поверхности литием является функцией времени выдержки при отжиге. Полученные закономерности указывают на качественное изменение поведения лития в отожженных фольгах сплава, полученных методом высокоскоростного затвердевания.

## ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ МНОГОКРАТНОГО УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МИШЕНЯХ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПИКОВ УПРУГО ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

В.П. Афанасьев<sup>1\*</sup>, Д.С. Ефременко<sup>2)</sup>, Л.Г. Лобанова<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> НИУ МЭИ, Москва, Россия

<sup>2)</sup> Германский центр авиации и космонавтики,

Оберпфaffenхофен, Германия

\* e-mail: v.af@mail.ru

Спектроскопия пиков упруго отраженных электронов (СПУОЭ) широко используется при исследовании поверхности твердого тела, так как позволяет проводить качественный и количественный анализ исследуемых образцов.

Построение количественной методики интерпретации результатов СПУОЭ сопряжено с решением ряда проблем, а именно, вычитанием фона неупруго рассеянных электронов, учетом влияния многократного упругого рассеяния на уширение и смещение пика упруго отраженных электронов, а также на интенсивность сигнала СПУОЭ, чему и посвящена настоящая работа. Процедура учета влияния многократного упругого рассеяния на интенсивность сигнала в однокомпонентных мишенях была хорошо отработана в ряде работ, практический же интерес представляют многокомпонентные мишени.

Расчет плотности потока электронов, упруго отраженных от поверхности многокомпонентных твердых тел, в данной работе выполняется на основе решения уравнения переноса. Решение строится на основе двух подходов: аналитическое решение граничных задач для уравнения переноса методом инвариантного погружения в малоугловом приближении и численное решение на основе Метода Дискретных Ординат (Discrete Ordinates Method – DOM). Преимуществом аналитического решения является быстрота получения результатов, однако, решение на основе DOM позволяет реализовать численную процедуру с любой наперед заданной точностью, поэтому погрешность аналитического решения определяется на основе сравнения результатов с результатами, полученными методом DOM.

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSWF-2023-0016.



ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ И КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ Ge  
ПРИ БОМБАРДИРОВКИ ИОНАМИ Ar<sup>+</sup>

Б.Е. Умирзаков, С.Т. Абраева, С.Т. Гулямова, И.Ф.Худойбердиев,  
Х.Х. Болтаев, Д.А. Ташмухамедова  
Ташкентский государственный технический университет,  
100095 Ташкент, Узбекистан,  
e-mail: ftmet@mail.ru

Изучение влияния бомбардировки ионами инертных газов на электронную и кристаллическую структуру монокристаллических образцов имеет как научный так и практический интерес /1-3/. Это в основном связано с тем, что разупорядочение приповерхностных слоев происходящих при ионной бомбардировке приводит к формированию упруго напряженных фаз и слоев, следовательно, к изменению распределения плотности состояния валентных электронов и ширины запрещенной зоны. В данной работе впервые изучено влияние низкоэнергетической бомбардировки ионами Ar<sup>+</sup> разными дозами на кристаллическую и электронную структуру Ge(111). В работе впервые методами оже-электронной и ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопией изучены изменения состава и электронной структуры поверхности монокристаллических образцов Ge(111) при бомбардировке ионами Ar<sup>+</sup> с E<sub>0</sub> = 1 keV разными дозами. Показано, что в процессе ионной бомбардировки вследствие разупорядочения приповерхностных слоев происходит изменение плотности состояния валентных электронов Ge(111). Установлено, что начиная с D=5·10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup> на спектре пропускания света при hν = 0,5 эВ появляется минимум. Появление этого минимума объясняется переходом атомов Ge из узлов к междоузлиям. Эти изменения происходят до дозы D=8·10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup>, которая соответствует полной аморфизации ионно-бомбардированных слоев.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Г.Н. Камаев, В.А. Володин, Г.К. Кривякин // Письма в ЖТФ, 2021, v. 47, № 12, С. 13.
2. Юсупжанова М.Б., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 4. С. 148.
3. Б.Е. Умирзаков, Д.А. Ташмухамедова, Э.А. Раббимов, Ж. Содикжанов, А.Н. Уроков // Поверхность. Рент., синхрот. и нейт. исс., 2019, № 12, С. 76.

ВЛИЯНИЕ СЛАБОТОЧНОГО ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ  
НЕОДНОРОДНЫХ МЕТАЛЛ-ОКСИДНЫХ ПЛЁНОК НА ИХ ПОСЛОЙНЫЙ  
ХИМИЧЕСКИХ СОСТАВ

Д.С. Лукьянцев<sup>1,\*</sup>, А.В. Лубенченко<sup>1</sup>, Д.А. Иванов<sup>1</sup>, О.Н. Павлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) НИУ «МЭИ», Москва, Россия

<sup>\*</sup>) e-mail: LukyantsevDS@mpei.ru

В настоящей работе представлено исследование послойного химического состава неоднородных окисленных тонких плёнок ниобия, которые подвергались многократному воздействию слаботочными пучками ионов аргона (ионный ток не превышал 1 мкА). Неразрушающий послойный химический анализ проведён с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (РФЭС УР) по методике [1]. До и после каждого цикла распыления плёнок определен послойный химический и фазовый состав по глубине образца. Получены зависимости относительных концентраций химических элементов мишени и их соединений от различных параметров ионного распыления. С помощью программы TRIM [2] рассчитаны парциальные коэффициенты распыления кислорода, углерода и ниобия для металл-оксидных плёнок с определённым послойным химическим составом.

При слаботочном ионном облучении металл-оксидной плёнки происходит преимущественное распыление кислорода, что, в свою очередь, приводит к модификации приповерхностных оксидных слоёв и образования различных субоксидных структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FSWF-2023-0016.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Lubenchenko A.V. et al., // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2018, T.12, C.692-700.
2. Ziegler J. F et al., // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2010, T.268, №.11-12, C. 1818-1823.

## ОСОБЕННОСТИ ОЧИСТКА МЕДИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА

З.А. Исаханов<sup>1</sup>, А.С. Халматов<sup>1</sup>, Р. Джаббарганов<sup>1</sup>, О. Бекмурзаева<sup>1</sup>,  
А.А. Ахмедов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, 100125 Ташкент,

<sup>2</sup>Филиал Ташкентского хим.-технологичес. института, г.Шахрисябз  
za.isakhanov@gmail.com

В настоящее время медная продукция широко применяется буквально во всех областях человеческой деятельности. Поэтому интенсивно разрабатывается различные технологические методы получения особо чистые, и качественную медь.

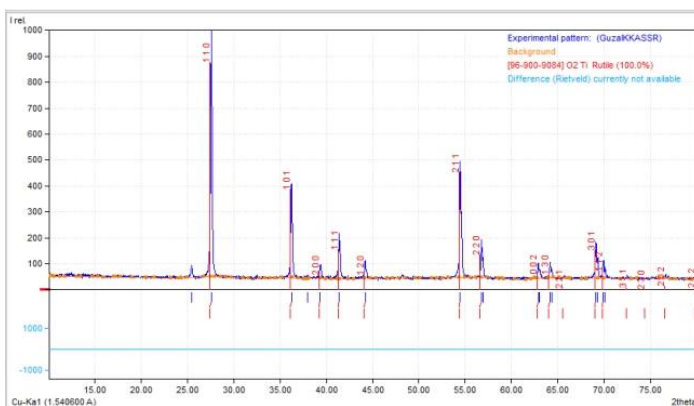
В данной работе изучены улучшения свойств меди и ее чистоты путем снижения вредных примесей, особенно газов (С, О, Н, N и т.д.). Экспериментально мы определили, что наличие примесей, как Р, As, Sb, Al, Fe, Sn сильно снижает электропроводность меди, и показали, что в структуре литой меди цепочки смеси  $\text{Cu}_2\text{O}+\text{Cu}$  располагаются между кристаллами Cu, что снижает пластичность меди, как в горячем, так и в холодном состоянии. Установлено, что ещё более разрушительное влияние при обработке давлением оказывает местных скопления  $\text{Cu}_2\text{O}$ , образующиеся в результате прорыва пленок закиси меди при разливе в формы. В меди так же встречается явление "водородной болезни", при которой происходит реакция  $\text{Cu}_2\text{O}+\text{H}_2=\text{H}_2\text{O}+2\text{Cu}$  между частичками закиси меди и водородом. Из этой реакции видно, что внутри металла выделяются пары воды  $\text{H}_2\text{O}$ , которые, в свою очередь, могут привести к возникновению микропор и микротрещин и, соответственно, ослаблению межкусталлических связей, в результате чего медь становится ломкой, хрупкой. Все результаты получены методом электронной оже-спектроскопии (ЭОС). Температура образца варьировался от 800 до 1250К. Экспериментальные факты свидетельствуют, что кислород в составе меди, в основном, находится в химически связанном состоянии ( $\text{CuO}$  и  $\text{Cu}_2\text{O}$ ), т. е. в хемосорбированном виде и это явление теоретически обосновано. Появление оже-пиков Al, P, S, Cl, N и Co указывает на присутствие их с малой концентрацией в объеме меди и при нагреве диффундировали из объема.

На основании вышеизложенного можно заключить, что определение элементного состава меди и особенно его химического состояния, в частности, наличия закиси меди и водорода, а также их соединения с кислородом имеет огромное научное и практическое значение.

## ПОРОШКОВАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИФРАКТОМЕТРИЯ ОКСИДА ТИТАНА

И.О. Косимов, З.А. Исаханов, Б.Е. Умирзаков, А.С. Халматов  
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, 100125 Ташкент  
za.isakhanov@gmail.com

Наноразмерный диоксид титана, является широкозонным полупроводником, имеет высокий потенциал применения в электронике и в электрооптике. В представляемой работе порошок рентгенофазовый метод анализа использовали для изучения структуры, состава, свойств сырьевых материалов оксида титана ( $\text{TiO}_2$ ). Особый интерес представляет синтез диоксида титана в тонкопленочном состоянии. Рентгенофазовый анализ состава частиц порошкового оксида титана показал, что в исходном материале присутствует не только преобладающая гексагональная  $\alpha$ -фаза металлического титана в виде твердого раствора кислорода, азота и углерода, а также нестехиометрические фазы внедрения  $\text{TiX}_z$ ,  $\text{TiX}_m\text{Y}_n$ , где  $\{X, Y\} = \{O, C, N\}$ . Последние присутствуют в порошковом материале в незначительных количествах в виде микро- и наночастиц. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с данными полученными другими методами.



На рисунке представлены спектральные угловые зависимости  $\text{TiO}_2$  полученные методом порошкового дифрактометра и индексы Миллера. Было определено межплоскостное расстояние  $d_{hkl}$  для данного образца.

Проведено оценка степени кристалличности и аморфности. Аморфная фаза для оксида титана составляет-81,13%, кристаллическая фаза составляет всего - 18,87 %. Это свидетельствует о том, что наш порошок в основном является аморфным. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с данными полученными другими методами и другими авторами.

ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ  $O_2^+$  НА СОСТАВ ПОВЕРХНОСТИ Ti

А.А. Абдуваитов, Ш.А. Талипова, Х.Э. Абдиев, М.Б. Юсупжанова,  
Д.А.Ташмухамедова, Б.Е. Умирзаков  
Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан,  
e-mail: fmet@mail.ru

В последнее время создание и конструирование наноструктур на основе оксидов металлов привлекло пристальное внимание исследователей в связи с их специфическими электронными и оптоэлектронными свойствами, а также более широким применением в промышленности и технике [1-3]. В данной работе впервые изучены состав и электронная структура нанопленок  $TiO_2$  полученных имплантацией ионов  $O_2^+$  в Ti в сочетании с отжигом.

С использованием методов вторичной ионной масс-спектрографии, оже-электронной спектроскопии, фотоэлектронной спектроскопии и спектроскопией упруго-отраженных электронов изучено изменения состава, плотности состояния электронов валентной зоны и параметры энергетических зон. Ti при имплантации ионов  $O_2^+$  и последующего отжига. Показано, что до отжига в приповерхностной области ионно-имплантированного Ti образуется слой, состоящий из оксидов типа  $TiO_2$ , Ti и несвязанных атомов Ti и O. После отжига при  $T = 800$  K в течении 30 мин формировалась однородная пленка  $TiO_2$  с толщиной  $\sim 25 - 30$  Å. Установлено, что ширина запрещенной зоны нанопленки  $TiO_2$  составляет  $\sim 3,1$  эВ, а значение сродства к электрону  $\chi = 3,8$  эВ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. G.R. Patzke, F. Krumeich, R. Nesper // *Angewandte Chemie International Edition*, 2002. V. 41, № 14, P. 2446-2461.
2. Д.А. Ташмухамедова, М.Б. Юсупжанова // *Поверхность. Рент., синхрот. и нейт. исс.*, 2016, № 12, С. 89.
3. Д.А. Ташмухамедова, М.Б. Юсупжанова // *Поверхность. Рент., синхрот. и нейт. исс.*, 2021, № 10, С. 60.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ОБЪЕКТОВС.С. Волков<sup>1,\*</sup>, Т.И. Китаева<sup>2</sup>, С.В. Николин<sup>3</sup><sup>1</sup>) Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище,  
г. Рязань, Россия

АО «Завод металлов и сплавов», г. Рязань

<sup>2</sup>) АО «Плазма», г. Рязань, Россия

\*) e-mail: volkovstst@mail.ru

При разработке новых материалов, изделий электронной техники и технологических операций всегда возникает необходимость в сведениях об атомном составе материалов, технологических сред и объектов в процессе производства [1]. В настоящее время существует много методов диагностики поверхности и объема материалов и изделий, в частности прецизионные и высокочувствительные методы зондовой электронной и ионной фотонной спектроскопии, рентгеновские, дифракционные, лазерные и другие методы анализа поверхности и объема твердых тел. Применение комплексов такого физико-аналитического оборудования позволяет получать практически всю необходимую информацию по составу и структуре об исследуемых объектах. При практическом применении таких комплексов в решении исследовательских и технологических задач возникают проблемы определения взаимосвязи полученных результатов исследований с решаемой задачей, например определения характера физических процессов в технологической операции или определения причин брака в технологическом процессе производства с выбором технического решения, приводящего к совершенствованию технологии изготовления изделия. В работе приведен ряд практических примеров и методические особенности исследований технологических объектов производства изделий электронной техники, металлов и сплавов.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Технология СБИС: В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ. / Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 401 с.

ВЛИЯНИЕ ПООЧЕРЕДНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ O<sup>+</sup> И N<sup>+</sup> НА  
СОСТАВ, СТРУКТУРУ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

В.Л. Воробьев<sup>1\*)</sup>, П.В. Быков<sup>1)</sup>, С.Г. Быстров<sup>1)</sup>, В.Я. Баянкин<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Удмуртский Федеральный исследовательский центр Уральского  
отделения РАН, Ижевск, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: Vasily\_L.84@udman.ru

Ионная имплантация азота в титановые сплавы позволяет существенно изменить характеристики поверхностных слоев, повышая их твердость, прочность, коррозионную стойкость и другие свойства [1-3]. Однако следует отметить, что, несмотря на исследования в этих направлениях, в работах практически не уделяется внимания влиянию химической активности имплантируемого элемента к компонентам титановых сплавов. В то время как, данное влияние может являться определяющим при формировании структурно-фазового состояния поверхностных слоев и их свойств при ионной имплантации [2]. Поэтому целью данной работы являлось исследование морфологии поверхности, химического состава, атомной структуры, механических и коррозионных свойств титанового сплава ВТ6 в зависимости от химической активности имплантируемых ионов к компонентам сплава ВТ6.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Höhl, H. Berndt, P. Mayr, H.-R. Stock // *Surface and Coatings Technology*. 1995. № 74-75. С. 765-769
2. В.Л. Воробьев и др. // *Физика металлов и металловедение*. 2021. Т. 122. № 12. С. 1 – 8.
3. L. Thair, U. Kamachi Mudali, N. Bhuvaneshwaran, K.G.M. Nair, R. Asokamani, B. Raj // *Corrosion Science*. 2003. № 45. С. 1951 – 1967.
4. Jie Jin, Yunbo Chen, Kewei Gao, Xiaolin Huang // *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 305. P. 9

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСНОГО СЛОЯ КОМПОЗИЦИОННОГО СПЛАВА САП-2 ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ МОЩНЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ

Т.В. Панова, В.С. Ковивчак  
Омский государственный университет  
им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия  
e-mail: panovatv@omsu.ru

Перспективным направлением в развитии новых технологических процессов направленного изменения свойств металлов и сплавов является использование высоких скоростей нагрева и охлаждения, реализуемых при обработке мощным ионным пучком наносекундной длительности (МИП). Результатом такого воздействия являются искажения кристаллической решетки, возрастание дефектов кристаллического строения, измельчение структурных элементов, возникновение упругих искажений в решетке и т.д. Все это в свою очередь может привести к изменению физико-механических характеристик материалов мишени. В настоящей работе были проведены исследования поверхностного слоя композиционного материала САП-2 после облучения МИП с различными режимами. Интерес к исследованию спеченных порошковых сплавов обусловлен зависимостью ряда свойств от размеров растворенных частиц. Сплавы САП состоят из алюминия и дисперсных чешуек  $Al_2O_3$ , которые эффективно тормозят движение дислокации и повышают прочность сплава. Облучение образцов проводили протон-углеродным пучком (30%  $H^+$  +70%  $C^+$ ,  $E \sim 200$  кэВ,  $j \leq 150$  А/см<sup>2</sup>,  $\tau=60$  нсек) при варьировании плотности ионного тока. Исследования проводили с использованием методик рентгеноструктурного анализа и растровой электронной микроскопии. Обнаружено небольшое снижение степени кристалличности фазы алюминия и возрастание практически в два раза (по сравнению с необлученным состоянием) размеров областей когерентного рассеяния. Сдвиги в сторону больших углов свидетельствуют о возникновении сжимающих остаточных напряжений. Наблюдается изменения содержания кислорода в облученном МИП слое при варьировании плотности тока пучка. Полученные результаты анализируются с учетом тепловых и ударно-волновых процессов реализуемые при таком воздействии.



ЭЛЕКТРОННЫЕ, ИОННЫЕ ПУЧКИ И ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННЫЙ  
РЕНТГЕНОВСКИЙ МИКРОАНАЛИЗ В КОМПЛЕКСНОМ  
ИССЛЕДОВАНИИ ЗОЛОТЫХ НИТЕЙ КАК ЭЛЕМЕНТОВ ДЕКОРА  
СРЕДНЕВЕКОВОГО ТЕКСТИЛЯ

Е.А. Созонтов<sup>1,\*</sup>, Э.А. Грешников<sup>1)</sup>, И.Н. Трунькин<sup>1)</sup>, И.И. Ёлкина<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Национальный исследовательский центр

“Курчатовский институт”, Москва, Россия

<sup>2)</sup> Институт археологии РАН, Москва, Россия

<sup>\*</sup>) e-mail: esozontov@yahoo.com

Золотные нити, как элемент декора средневекового текстиля, состоят из тонкой металлической ленты, как правило, драгоценного металла (золото, серебро), навитой спирально на нить-сердечник. Исследование морфологии и химического элементного состава приповерхностного слоя образца ленты проводилось с использованием двухлучевого электронно-ионного микроскопа Helios NanoLab 600i (Thermo Fisher Scientific, США), оснащенного Si (Li) детектором (EDAX, США) для энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (РЭМ).

В результате анализа проведенных измерений химического элементного состава по глубине, вытравленной ионным пучком «шахты» в металлической ленте-оплетке, было установлено наличие золотого поверхностного покрытия толщиной примерно 1,5-2 микрона, в котором содержание золота на поверхности ленты возрастает до 18-20 масс %. Одновременно мы наблюдаем на поверхности образца уменьшение содержания серебра до 70-71 масс % и уменьшение содержания меди до 1 масс %. По мере продвижения в глубину образца, содержание золота резко падает и одновременно наблюдается рост содержания серебра и меди. По данным проведенного анализа мы можем заключить, что лента была изготовлена из серебра с примесью меди и покрыта сверху тончайшим слоем золота.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИЕЙ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ  
ТВЕРДОФАЗНОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В Si(111)  
ИМПЛАНТИРОВАННОМ ИОНАМИ P<sup>+</sup>

Б.Ф. Фаррахов<sup>1</sup>, Я.В. Фаттахов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>) КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия  
e-mail: bulat\_f@mail.ru

Из анализа и обработки дифракционных сигналов, полученных при зондировании имплантированных периодических структур Si He-Ne лазером ( $\lambda=0.6328$  мкм) во время импульсного светового отжига, определена энергия активации  $E_a$  процесса твердофазной рекристаллизации, которая составила 2.3 эВ. В работе применялась разработанная ранее оптическая дифракционная методика изучения динамики фазовых переходов и температуры [1/].

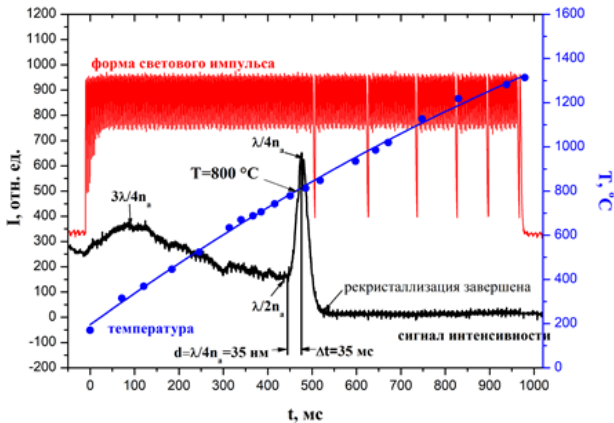


Рис. 1. Сигнал интенсивности первого дифракционного максимума, полученный на ФЭУ при облучении импульсом длительностью 970 мс и плотностью мощности  $140 \text{ Вт} \times \text{см}^{-2}$  и динамика температуры. Образец: Si (111), имплантированный ионами P<sup>+</sup> с энергией 50 кэВ и дозой  $3.12 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$

Из отношения расстояния между пиками (минимумами) и временем находится скорость рекристаллизации  $V_p = d/\Delta t$  (рис. 1). Для нахождения  $E_a$ ,  $V_p$  подставляется в уравнение Аррениуса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Галяутдинов М.Ф. // ПТЭ, 2019, № 2, с. 93-98.

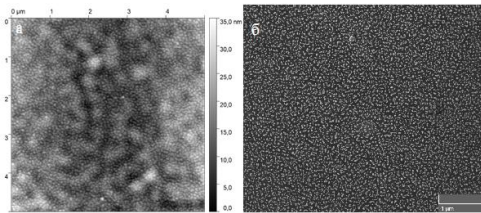
## ВЛИЯНИЕ НА ПОЛИМЕРНУЮ ПОДЛОЖКУ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА

В.М. Студзинский<sup>1,2</sup>, К.В. Карабешкин<sup>1</sup>, М.В. Мишин<sup>2</sup>, Е.Д. Федоренко<sup>1</sup>,  
П.А. Карасев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Алферовский университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе исследовалось влияние облучения ионами Р,  $\text{PF}_4$  и Та с энергией 0.6 кэВ/а.е.м. на тонкие (100 нм) плёнки ПММА в процессе формирования на их поверхности наноструктур из слоев золота толщиной 5 и 10 нм. Сравнение экспериментальных данных проводилось при одинаковом количестве смещений атомов золота (DPA). Изменение химических связей в полимере исследовано при помощи ИК-Фурье спектроскопии. Для получения хорошо разделенных золотых наночастиц на ПММА требуются более высокие дозы, чем на кремнии. Видно (см.рис.), что в процессе формирования золотых наночастиц, морфология поверхности плёнки претерпела существенные изменения. Облучение формирует наноразмерные особенности в полимерной пленке и наночастицы золота на поверхности. Наблюдается деградация полиметилметакрилата за счёт разрушения связи  $-\text{CH}_2-$  и формирование групп  $-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$ . Декомпозиция полимера влияет на замедление формирования наночастиц на поверхности. Облучение молекулярными ионами  $\text{PF}_4$  эффективнее модифицирует слой металла в сравнении как с легкими атомарными ионами Р, так и с тяжелыми ионами Та.



АСМ(а) и СЭМ(б) изображения образца после облучения  $\text{PF}_4$  до дозы  $8.1 \cdot 10^{-1}$  DPA.

Отрезок шкалы 1 мкм.

Работы в Алферовском Университете выполнялись в рамках госзадания Минобрнауки РФ № FSRM-2023-0009.

## ИМПУЛЬСНАЯ ИОННАЯ ОБРАБОТКА И ТЕРМИЧЕСКИЙ ОТЖИГ САПФИРА, ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ ХРОМА

Р.И. Баталов, Г.А. Новиков, Д.А. Файзуллин, Н.В. Курбатова,  
К.И. Герасимов

КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: batalov@kfti.knc.ru

Кристалл рубина (матрица сапфира  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с примесью ионов  $\text{Cr}^{3+}$ ) является активной средой для импульсных лазеров на  $\lambda = 0.694$  мкм, начиная с 60-х годов. При этом актуальной научной и практической задачей является создание компактных и интегральных лазеров на базе кристаллов и тонких плёнок  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ , а также различных датчиков, чувствительных к механической деформации, дозе облучения или к изменению температуры. Такие воздействия влияют на положение и интенсивность  $R$ -линии люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}$ . В данной работе изучалось легирование приповерхностной области монокристалла сапфира  $r\text{-Al}_2\text{O}_3(1-102)$  ионами  $\text{Cr}^+$  методом ионной имплантации с энергией ионов  $E = 40$  кэВ и дозами  $\Phi = 10^{13}$ - $10^{16}$  см<sup>-2</sup>. После имплантации апробировалось применение импульсной ионной обработки (ИИО) в режиме расплава ( $T > 2000$  °С) в качестве альтернативы термическому отжигу (ТО) при  $T = 1000$  °С для получения люминесценции  $R$ -линии при 300 К. Такая ИИО проводилась на импульсном ускорителе ТЕМП-4 мощным пучком ионов  $\text{C}^+/\text{N}^+$  с энергией  $E \approx 300$  кэВ, плотностью энергии  $W \approx 0.9$  Дж/см<sup>2</sup> при длительности импульса  $\tau \approx 100$  нс. Проведено моделирование глубинного профиля ионов  $\text{Cr}^+$  в  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , позволившее оценить концентрацию хрома в кристалле (до 2 ат.% в слое 50 нм) до отжига. Проведены сравнительные измерения образцов  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^+$  после ИИО и ТО методами оптического пропускания, Рамановского рассеяния и ФЛ. Несмотря на отсутствие в спектрах пропускания характерных полос поглощения ионов  $\text{Cr}^{3+}$  при 410 и 560 нм, имплантированные образцы показывают схожую по интенсивности люминесценцию  $R_1$  и  $R_2$  линий, которая растёт с дозой имплантации.

СО-ИМПЛАНТАЦИЯ КРЕМНИЯ ИОНАМИ ИНДИЯ, МЫШЬЯКА И СУРЬМЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ УЗКОЗОННЫХ АЗВ5 ПОЛУПРОВОДНИКОВ, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ИК-ФОТОПРИЁМНИКОВ

Р.И. Баталов, Д.А. Файзуллин, В.Ф. Валеев,  
В.И. Нуждин, А.М. Рогов, А.Л. Степанов  
КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия  
\*) e-mail: batalov@kfti.knc.ru

Узкозонные АЗВ5 полупроводники - антимонид индия InSb ( $E_g=0.17$  эВ) и арсенид индия InAs ( $E_g=0.35$  эВ) широко применяются в научных исследованиях и промышленности в качестве охлаждаемых фотоприёмников ИК излучения с длиной волны 2-7 мкм. При этом данный спектральный диапазон соответствует области прозрачности монокристаллов Si ( $E_g=1.1$  эВ), применяемых для фотодиодов на спектральную область 0.3-1.1 мкм. Проблема расширения области поглощения и фоточувствительности Si на ближнюю и среднюю ИК-область представляет большой практический интерес. Решение данной проблемы может быть реализовано путём создания наночастиц InSb и InAs в матрице Si. Формирование таких наночастиц может быть проведено путём последовательной имплантации ионов  $In^+$  и  $Sb^+$  (или  $In^+$  и  $As^+$ ) в Si с последующим термическим или импульсным (лазерным или ионным) отжигом. В данной работе представлены результаты последовательной имплантации монокристалла p-Si ионами (In+Sb) и (In+As) с энергией ионов 30-40 кэВ и дозами  $3 \times 10^{16}$  и  $6 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> без стадии отжига. Проведено моделирование глубинных профилей примесей без или с учётом распыления. Методами SEM/EDX/EBSI исследована структура поверхности и её элементный состав. Получены спектры отражения в области 200-1100 нм и спектры пропускания в ИК-области (1-10 мкм). Показано смещение профилей к поверхности и потеря части примеси с ростом дозы ионов. Со-имплантация приводит к аморфизации Si и к росту поглощения в ИК-области.

## ЭФФЕКТ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ

А.И. Пушкарев<sup>\*)</sup>, Ю.И. Егорова, С.С. Полисадов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия

<sup>\*)</sup> aipush@mail.ru

Представлены результаты модификации WC образцов импульсным пучком ионов азота (250-300 кэВ, 120 нс) с плотностью энергии 7-8 Дж/см<sup>2</sup>. Показано, что изменение структуры в приповерхностном слое происходит на глубине 20-30 мкм, что значительно превышает пробег ионов в мишени ( $\approx 0.2$  мкм) и глубину распространения теплового фронта в течение импульса ( $\approx 2$  мкм). Аналогичный эффект дальнего действия обнаружен при облучении керамик на основе ZrO<sub>2</sub> и  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> непрерывным пучком ионов аргона с энергией 30 кэВ [1] и импульсным пучком ионов углерода (250-300 кэВ, 120 нс) с плотностью энергии 1 Дж/см<sup>2</sup> [2].

Показано, что эффект дальнего действия может быть связан с перезарядкой ионов и формированием быстрых (fast) атомов [3]. Пробег быстрых атомов в мишени значительно превышает пробег ионов из-за снижения малоуглового рассеяния и потерь энергии на взаимодействие с электронами мишени [3]. Выполнено моделирование перезарядки ионов в газовом слое десорбированных молекул и в приповерхностном слое мишени. Получено, что толщина газового слоя в 5-15 раз превышает длину эффективной перезарядки ионов и молекул в процессах  $C^+ + N_2 \rightarrow C^0$  и  $C^+ + O_2 \rightarrow C^0$ .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00016, <https://rscf.ru/project/23-29-00016>

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. S. Ghyngazov, V. Ovchinnikov, V. Kostenko, N. Gushchina, F. Makhinko. // *Surface and Coatings Technology*, 2020, v. 388, p. 1.
2. С.А. Гынгазов, Xiao Peng Zhu, А.И. Пушкарев, Ю. И. Егорова, С. В. Матренин, В. А. Костенко, С. С. Zhang, Mingkai Lei // *Известия высших учебных заведений. Физика*, 2020, т. 63, №1, С. 159-161.
3. A. Pushkarev, A. Prima, V. Myshkin, N. Chistyakova, V. Ezhov. Comparison of influence of the fast atoms beam and ion beam on the metal target // *Laser and particle beams*, 2021, 6630259.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРИСТЫХ И НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО ОБРАТНОГО РАССЕЙНИЯ

Н.В. Ткаченко<sup>1,\*</sup>), А.И. Каменских<sup>2)</sup>, С.А. Тютяков<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

<sup>2)</sup>Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: nicki\_tkak@mail.ru

Исследования модифицированных поверхностей материалов представляют собой большую практическую ценность. Существует множество методов для определения элементного состава образцов. В данной работе использовался метод обратного ядерного рассеивания (ЯОР) [1], заключающийся в анализе спектров, полученных рассеянными под углом, близким к 180°, протонами, падающих на исследуемую мишень. Энергия рассеянных протонов зависит от вещества, на котором они рассеялись, и от глубины его нахождения в образце.

При этом получившиеся спектры уширяются вследствие страгглинга. Среди причин страгглинга можно выделить такие как неидеальная монохроматичность пучка, разрешение детектора, неоднородность материала мишени по плотности. В данной работе исследуется влияние неоднородности материала мишени на уширение спектров.

Были построены и обработаны спектры рассеяния протонов на различных пористых и неоднородных мишенях, таких как порошковые Mg и Al и их гидриды, МДО покрытия Zr до и после тепловых испытаний, а так же многих других. В результате работы было изучено влияние неоднородности по плотности на форму спектров, а также установлены точные элементные составы некоторых покрытий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Востриков В.Г., Каменских А.И., Ткаченко Н.В. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2020. №1 С. 28-35.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК АНАЛИЗА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА  
ОСНОВЕ СПЕКТРОМЕТРИИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ПРОТОНОВН.В. Ткаченко<sup>1,\*</sup>), А.И. Каменских<sup>2)</sup>, С.А. Тюфтяков<sup>2)</sup><sup>1)</sup>НИИЯФ МГУ, Москва, Россия<sup>2)</sup>Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия<sup>\*</sup>) e-mail: nicki\_tkak@mail.ru

Для исследования полимерных материалов в настоящей работе предложены методики на основе спектрометрии ядерного обратного рассеяния протонов (ЯОР). По сравнению с традиционными ядерно-физическими методами методики определения элементного содержания водорода на основе спектрометрии ЯОР [1] имеет меньшую точность и требует наличия эталонного образца, но при этом позволяет проводить анализ на глубине до 100 мкм (для  $E_p=7.5$ ). Также следует отметить, что для водородосодержащих материалов одним из главных критериев выбора метода анализа является радиационный урон, связанный с высвобождением водорода и дальнейшей его миграцией вглубь материала. Сечение высвобождения в случае рассеяния протон-водород на порядки ниже, чем у иных ядерно-физических методов, что делает спектрометрию ЯОР протонов оптимальной для анализа водородосодержащих материалов.

Проведен анализ полиэтиленовых и полиимидных пленок, а также наполнений пористых покрытий на основе полипараксилена. Выполнена оценка радиационного урона пучком протонов с  $E_p=7.5$ , проведен элементный анализ пленок до и после плазменных испытаний и исследовано проникновение полимерных материалов в пористых материалах.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

2. Востриков В.Г., Каменских А.И., Ткаченко Н.В. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2020. №1 С. 28-35.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОК SiO<sub>2</sub>, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ Zn, В КАЧЕСТВЕ АКТИВНОЙ СРЕДЫ МЕМРИСТОРОВ

В.В. Привезенцев<sup>1)</sup>, А.А. Фирсов, А.П. Сергеев<sup>1)</sup>, В.С. Куликаускас<sup>2)</sup>,  
В.В. Затекин<sup>2)</sup>, Е.П. Кириленко<sup>3)</sup>, А.В. Горячев<sup>3)</sup>, А.А. Ковальский<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, Россия

<sup>2)</sup> НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

<sup>3)</sup> ИНМЭ РАН, Москва, Россия

<sup>4)</sup> ИПТМ РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия

Представлены результаты исследования пленок SiO<sub>2</sub>, имплантированных Zn и окисленных при повышенных температурах, в качестве активной среды мемристоров.

На кварцевые подложки методом электронно-лучевого испарения были нанесены слой золота толщиной 100 нм (нижний электрод), а затем пленка SiO<sub>2</sub> толщиной 150 нм. Для получения равномерного распределения цинка по толщине пленки была проведена имплантация при энергиях 20 и 120 кэВ с дозой  $5 \times 10^{16}/\text{см}^2$ . Образцы отжигались на воздухе в течение 40 мин в диапазоне температур 400-800°C с шагом 100°C. Верхние электроды в виде кругов диаметром 1.5 мм получались напылением на пленку SiO<sub>2</sub> через маску слоя Al толщиной 200 нм.

Исследование профилей имплантированного Zn было проведено с помощью резерфордовского обратного рассеяния ионов гелия с энергией 700 кэВ, а также методом времяпролетной масс-спектрометрии. Химическое состояние цинка и фазовый состав пленки SiO<sub>2</sub> определяли методами Оже-электронной спектроскопии и комбинационного (рамановского) рассеяния света.

Установлено, что после имплантации цинк имеет 2 максимума на глубинах 20 и 85 нм, а после отжига при 700°C имеется уширенный максимум на глубине 40 нм. После отжига при 700°C в образце формируются кластеры с фазой ZnO·Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> вблизи верхней поверхности пленки SiO<sub>2</sub> и с фазой Zn·ZnO в ее глубине. После отжига при 700°C ВАХ полученных пленок имеют характерный для мемристоров гистерезис.

## МОРФОЛОГИЯ Ti ПЛЕНКИ ПОЛУЧЕННОЙ НА ОБЛУЧЕННОЙ ИОНАМИ КСЕНОНА КРЕМНИЙ КАТОДНЫМ ВАКУУМНЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ ПРИ ИОННОМ АССИСТИРОВАНИИ

О.М. Михалкович<sup>1,\*</sup>, С.М. Барайшук<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка, Минск, Беларусь

<sup>2)</sup> Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь

<sup>\*)</sup> e-mail: Phyzbober@tut.by

В нашей работе образцы кремния предварительно облучались ионами  $\text{Xe}^+$  с энергиями в диапазоне 10-40 кэВ при флюенсе  $9 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , затем вакуумным катодным распылением осаждались Ti пленки при ассистировании ионами титана. Ускоряющий потенциал равнялся 7 кВ, поток ассистирующих ионов  $(2,5-9,9) \cdot 10^{16} \text{ Ti}^+/\text{см}^2$ . Отношение ионизированной фракции к нейтральной составляло 0,02. Композиционный состав, сформированных пленок определялся ранее /1/. Определение параметров морфологии осуществлялось с применением атомно-силового микроскопа NT-206. Коэффициент распыления Si ионами  $\text{Xe}^+$  оценивался по эмпирическим формулам, предложенным в /2/. Теоритические оценки в используемом интервале энергий дают значение в 2.4 - 2.8 атом/ион.

В работе рассматривается воздействие предэкспонирования ионами  $\text{Xe}^+$  подложек Si и распыление поверхности кремния, сопровождающее облучения ионами ксенона, на морфологию осаждаемых Ti пленок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь № ГР 20211394.

### ЛИТЕРАТУРА

1. N. Matsunami [et al.], Energy dependence of the yields of ion-induced sputtering of monoatomic solids, Nagoya: Institute of Plasma Physics, 1983, 284 p.
2. И. С. Ташлыков, О. Г. Бобрович, С. М. Барайшук, О. М. Михалкович, И. П. Антонович // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2009, № 5, С. 92–95

СПЕКТРОСКОПИЯ ПОЛНОГО ТОКА ПРИ ОКИСЛЕНИИ ПОВЕРХНОСТИ  
МЕДИ

Ф.Д. Акбарова<sup>1,\*</sup>), М.А. Каримов<sup>2)</sup>, С.У. Туропова<sup>3)</sup>, Р.Джаббарганов<sup>4)</sup>,  
У.Б. Шаропов<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>Физико-технический институт, АНРУз, Ташкент, Узбекистан

<sup>2)</sup>Ташкентский государственный технический университет  
им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

<sup>3)</sup>Институт материаловедения, АНРУз, Ташкент, Узбекистан

<sup>4)</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АНРУз,  
Ташкент, Узбекистан

<sup>5)</sup>Национальный исследовательский институт возобновляемых источников  
энергии, Ташкент, Узбекистан

\*) e-mail: akbarovaferuza580@gmail.com

В настоящее время уже хорошо известно, что элементы, содержащиеся в объеме металла в качестве малых примесей с увеличением его температуры диффундируют на поверхность и вступает в химические реакции как с частицами сорбированных газов, так и с поверхностными атомами самого металла. Методом спектроскопии полного тока (ПТ) был проведен цикл работ по исследованию процесса окисления поверхности меди.

Получен спектр ПТ очищенной поверхности меди, и в процессе температурного отжига и окисления. Из сравнения спектров ПТ можно сказать, что сдвиг положения первичного максимума в высокоэнергетическую сторону показывает увеличению работы выхода поверхности на 1,5эВ.

Работа выхода поверхности чистой меди на 1,5эВ меньше, чем у загрязненной поверхности меди. Это, в свою очередь, указывает на уменьшение отрицательного заряда на поверхностных состояниях при адсорбции кислорода на поверхности меди. Можно сказать, что кислород занимает свободные поверхностные валентные зоны меди, уменьшая плотность электронных состояний.

Пока что не ясным остаётся вопрос: окисление поверхности меди вызвано остаточным газом в вакууме или диффузией примесных атомов из объема на поверхность образца.

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОПЛЕНОК NiSi<sub>2</sub> ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

А.К. Ташатов, Н.М. Мустафоева, С.М. Эшбобоев  
 Каршинский государственный университет, 180003 г. Карши, Узбекистан  
 \*) e-mail: mustafoevan@gmail.com

На основе полученных данных и опираясь на результаты ОЭС (рис.1) кинетику формирования сравнительно толстой пленки ( $\geq 200 \text{ \AA}$ ) силицида никеля при твердофазной эпитаксии можно представить следующим образом. При напылении атомов Ni на поверхность Si при комнатной температуре с толщиной  $d \geq 200 \text{ \AA}$  формируется аморфная сплошная однородная пленка Ni. На границе Ni-Si происходит некоторая взаимодиффузия атомов Ni в Si и Si в Ni.

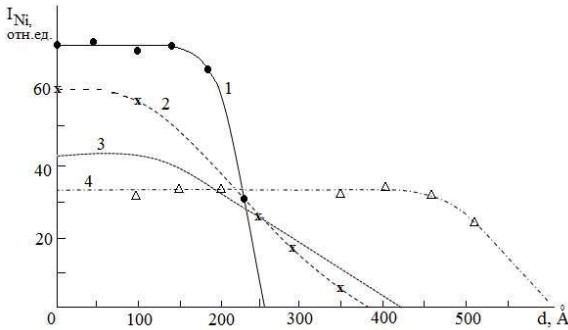


Рис. 1. Зависимость интенсивности  $L_3M_{45}M_{45}$  Оже-пика Ni ( $E=848 \text{ эВ}$ ) от глубины для системы Ni/Si прогретого при  $T=900 \text{ K}$  в течение, мин.: 1-0, 2-15 мин, 3-25 мин, 4-40 мин. Толщина Ni -200  $\text{\AA}$ .

В этих слоях частично образуются силициды типа  $Ni_x Si_y$ . Изменения состава в пленке Ni и подложке происходит до  $t=40-50$  мин. При этом на поверхности Si формируется монокристаллическая пленка NiSi<sub>2</sub> с толщиной  $\sim 500-550 \text{ \AA}$ . Увеличение  $T$  до  $1000 \text{ K}$  приводило к уменьшению концентрации Ni и образованию соединения близкой к NiSi<sub>3</sub>.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Tashatov A.K. Mustafоеva N.M. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2020, Vol.14, No 1, pp. 81-84.

ИЗУЧЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЛЕНТОЧНЫХ  
АМОРФНЫХ СПЛАВОВ Fe(Ni, Cu)(SiB), ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ  
СВЕРХБЫСТРОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Т.П. Каминская<sup>1,\*</sup>, М.Н. Шипко<sup>2)</sup>, М.А. Степович<sup>3)</sup>, А.А. Вирюс<sup>4)</sup>,  
А.И. Тихонов<sup>2)</sup>, В.В. Попов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

<sup>2)</sup>Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,  
Иваново, Россия

<sup>3)</sup>Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского,  
Калуга, Россия

<sup>4)</sup>Институт экспериментальной минералогии им. Академика Д.С. Коржинского  
РАН, Черногловка, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: ktp53@mail.ru

Методы растровой электронной и магнитно-силовой микроскопии использованы для изучения свойств поверхности, определяющих доменную структуру ленточных аморфных сплавов Fe (Ni, Cu) (SiB), полученных методом сверхбыстрого охлаждения на вращающемся барабане. Магнитный контраст проявлялся после магнитоимпульсной обработки (МИО) фольги в областях ленты на не прилегавшей к барабану стороне (т.н. свободные области). В областях, удалённых от крупных дефектов, характерным являлось появление полосовых доменов шириной 0,6-1,0 мкм. На поверхности этой стороны ленты в областях, где сплав не являлся гомогенным и содержал включения либо дефекты (разрывы, царапины), образовывались замыкающие домены, т.н. клиновидные домены Нееля. Ширина доменов (около 1,5 мкм) зависела от режимов МИО незначительно. В некоторых свободных областях поверхности фольги в результате МИО возникали довольно большие клинообразные домены с размерами до нескольких десятков микрометров.

## ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВОГО СОСТАВА СЛОЕВ, ФОРМИРУЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВОВ ТИТАНА

В.В. Поплавский<sup>1\*)</sup>, И.Л. Поболь<sup>2)</sup>, А.Н. Дробов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Беларуский государственный технологический университет,  
Минск, Беларусь

<sup>2)</sup> Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь  
<sup>\*)</sup> vasily.poplav@tut.by

Ионно-плазменному азотированию подвергались два сплава титана: ВТ1-0 и ОТ4-1. Сплав ВТ1-0 не содержит в своем составе легирующие элементы, только незначительное количество примесей. Его структура представлена  $\alpha$ -фазой. Сплав ОТ4-1 в качестве легирующих элементов содержит алюминий и марганец и относится к псевдо- $\alpha$ -сплавам, структура которых представлена в основном  $\alpha$ -фазой и небольшим количеством  $\beta$ -фазы. Ионно-плазменную обработку поверхности образцов проводили в среде состава 10 %  $N_2$  + 90 %  $Ar$  при различных температурах в интервале от 650 °С до 900 °С.

По данным рентгенофазового анализа в поверхностном слое сплава ВТ1-0 при невысоких температурах (примерно до 700 °С) формируются преимущественно оксидные фазы  $Ti_6O$ ,  $Ti_3O$ . При повышении температуры (>800 °С) преобладает процесс образования нитридных фаз  $Ti_2N$ ,  $TiN$ . При исследовании серии образцов сплава ОТ4-1 со слоями, полученными при ионно-плазменной обработке различной продолжительности при 850 °С установлено, что обработка поверхности в течение уже одного часа приводит к существенному изменению фазового состава. Фаза титана в составе исследуемого слоя не обнаруживается, в то время как в исходном образце регистрируется только  $\alpha$ -титан. Вначале преобладает образование оксидных фаз  $Ti_6O$  и  $Ti_3O$ , и только при увеличении длительности обработки до семи часов появляется фаза нитрида титана  $TiN$ .

Такие особенности изменения фазового состава слоев, формируемых на поверхности сплавов титана в процессе ионно-плазменного азотирования при различных температурах и при различной длительности процесса ионно-плазменной обработки, обусловлены свойствами титана и наличием на поверхности оксидной пленки.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА EXELFS СПЕКТРОВ БЕЗ УЧЕТА  
АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИЭ.Ф. Хаметова<sup>1,2\*)</sup>, О.Р. Бакиева<sup>2)</sup><sup>1)</sup> УдГУ, Ижевск, Россия<sup>2)</sup> ФТИ УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия

\*) e-mail: elinaphanilevna851@gmail.com

Один из современных методов исследования локальной атомной структуры - EXELFS метод (Extended Electron Energy Loss Fine Structure), основанный на электронном возбуждении. EXELFS спектры формируются в результате когерентного рассеяния вторичного электрона на локальном окружении возбуждаемого атома. Экспериментальные спектры содержат информацию о параметрах локальной атомной структуры: парциальных координационных числах, длинах химической связи и параметров тепловой дисперсии. Для проведения количественного анализа по экспериментальным EXELFS спектрам необходимо знание априорной информации об исследуемом объекте: группа симметрии, тип кристаллической решетки, значения параметров решетки (a, b, c), координаты уникальных положений атомов (x, y, z). Данная информация необходима для расчета амплитуд и фаз обратного рассеяния. Получение априорной информации требует от исследователя использования дополнительных методик анализа, что может сильно усложнить дизайн эксперимента, увеличив его трудоемкость. Таким образом, данная работа посвящена разработке метода для анализа EXELFS спектров, при использовании которого не требовалась бы начальная информация о кристаллографических параметрах. Апробация метода была проведена на экспериментальных спектрах титана и его оксидах в различных модификациях. Предложенный алгоритм позволяет проводить анализ локальной атомной структуры по экспериментальным EXELFS спектрам с использованием машинного обучения.

Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» УдмФИЦ УрО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ гос. регистрации 121030100002-0).

## ОСОБЕННОСТИ ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ СЛОЕМ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Н.В. Новиков\*, Н.Г. Чеченин, А.А. Широкова  
 НИИЯФ МГУ, Москва, Россия  
 \*e-mail: nvnovikov65@mail.ru

Рассматривается зависимость коэффициента отражения электронов от слоя, состоящего из углеродных нанотрубок (УНТ), ориентированных перпендикулярно (рис. 1а) и вдоль (рис. 1б) поверхности мишени, в зависимости от угла падения  $\alpha$  и энергии электронов  $E_0$ . Мишень задается в виде 91 УНТ, центры которых расположены с шагом треугольной решетки 1 нм друг от друга. Каждая УНТ из графита плотностью  $2.25 \text{ г/см}^3$  задается в виде полого цилиндра с радиусами  $R = 0.45 \text{ нм}$  и  $r = 0.35 \text{ нм}$ .

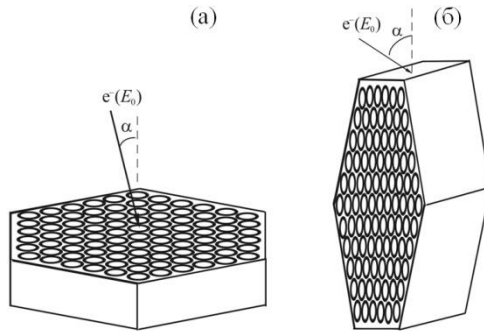


Рис. 1 Варианты ориентации слоя из углеродных нанотрубок при отражении электронов под углом  $\alpha$

Результаты расчетов с помощью программы PENELOPE [1] дают anomalно малый коэффициент отражения ( $F_{ref} < 0.001$ ) в диапазоне углов  $\alpha > 10^\circ$  для случая на рис.1а и  $\alpha < 80^\circ$  для случая на рис.1б. Эффект объясняется изменением потоков электронов в поверхностных слоях мишени за счет их каналирования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Sempau J. et al. // NIM B. 2003. V. 207. P. 107.



## ИОННО-ИМПЛАНТАЦИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ GaAs ВИСМУТОМ

О.В. Вихрова<sup>1)</sup>, Ю.А. Данилов<sup>1)</sup>, Ю.А. Дудин<sup>1)</sup>, Д.А. Здравейшев<sup>1)</sup>,  
А.В. Нежданов<sup>1)</sup>, А.Е. Парафин<sup>2)</sup>, Е.А. Питиримова<sup>1\*)</sup>, С.М. Планкина<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород, Россия

<sup>2)</sup> Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: pitirimova@phys.unn.ru

Висмут является изовалентной примесью при замещении атомов As в решетке GaAs. Легирование атомами Bi (обычно методами эпитаксии) приводит к уменьшению запрещенной зоны GaAs и к увеличению спин-орбитального взаимодействия. В работе исследованы особенности ионного легирования для получения GaAs:Bi с контролем состава. Облучение производилось на ускорителе «Радуга-3М» с использованием в качестве источника металлической пластины Bi. Ускоряющее напряжение составляло 30 или 80 кВ, а доза соответствовала средней концентрации атомов Bi в имплантированном слое 0.5, 1 и 1.5 ат.%. После имплантации выполнялся быстрый термический отжиг при 800°C в течение 20 с или отжиг импульсом эксимерного лазера KrF (длина волны излучения и длительность импульса равны 248 нм и 30 нс, соответственно) с плотностью энергии 250 - 400 мДж/см<sup>2</sup>. Электронография на отражение свидетельствовала о восстановлении монокристаллической структуры при обоих типах отжига. Спектры пропускания вблизи края поглощения GaAs:Bi позволили определить уменьшение ширины запрещенной зоны от 1.42 эВ (исходный GaAs) до 1.37 эВ (GaAs, легированный Bi до 1.5 ат.% и отожженный). Анализируются результаты исследования образцов GaAs:Bi методом комбинационного рассеяния света, а также электрические свойства из измерений эффекта Холла. Таким образом, метод ионной имплантации является перспективным приемом введения Bi в GaAs при использовании соответствующего режима отжига.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект №23-29-00312).

РЕНТГЕНОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОКОМПОЗИТОВ Fe-NiCr,  
ПОЛУЧЕННЫХ В ПОДВОДНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

М.Н. Шипко<sup>1)</sup>, А.В. Агафонов<sup>2)</sup>, М.А. Степович<sup>3)</sup>, З.Х. Калажоков<sup>4)</sup>,  
Х.Х. Калажоков<sup>4)</sup>, А.В. Хлюстова<sup>2\*)</sup>, Н.А. Сироткин<sup>2)</sup>, А.А. Вирус<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,  
Иваново, Россия

<sup>2)</sup>Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

<sup>3)</sup>Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского,  
Калуга, Россия

<sup>4)</sup>Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,  
Нальчик, Россия

<sup>5)</sup>Институт экспериментальной минералогии им. Академика Д.С. Коржинского  
РАН, Черноголовка, Россия

\*) e-mail: avlada5577@gmail.com

Рентгеновская дифрактометрия и рентгеноспектральный микроанализ использованы для изучения состава наночастиц Fe-NiCr, полученных в импульсной подводной низкотемпературной плазме.

Установлено, что в условиях подводной плазмы можно провести синтез слоистых структур типа мейкснерита. Определён элементный состав и параметры кристаллической решетки полученных слоистых структур в зависимости от условий проведения эксперимента: межплоскостное расстояние  $d_{003}$  и  $d_{110}$ , параметры решётки  $a$  и  $c$ , размеры кристаллитов. Поверхность всех исследованных образцов содержала большее количество кислорода, что связывается с условиями получения наночастиц. В то же время для всех экспериментов характерным являлось низкое содержание хрома.

ХИМИЧЕСКИЕ СВЯЗИ И СТРУКТУРА ПОКРЫТИЙ ПРИ ОСАЖДЕНИИ ИОНОВ C<sub>60</sub> В АТМОСФЕРЕ АЗОТАГ.С. Дегтяренко<sup>1)</sup> Е.Н. Кабачков<sup>2)</sup> И.И. Ходос<sup>3)</sup>, В.Е. Пуха<sup>2)</sup>, Г.В. Нечаев<sup>2)</sup><sup>1)</sup> ФФФХИ МГУ, Москва, Россия<sup>2)</sup> ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черноголовка, Россия<sup>3)</sup> ИПТМ РАН, Черноголовка, Россия

В докладе приведены результаты исследований структуры и химических связей покрытий, полученных из ускоренных ионов C<sub>60</sub> в атмосфере азота. Возникновение зоны высоких давлений и «теплого пика» при ударе иона C<sub>60</sub> может приводить к образованию новых нитридных фаз [1], которые кардинально изменяют структуру и свойства покрытия. Покрытия осаждались на Si и Ti подложки при температуре подложек (Ts) 20-400°C и давлении N<sub>2</sub> 2·10<sup>-2</sup> Па. Пары C<sub>60</sub> из двух эффузионных ячеек направлялись в анодную область ионного источника с седловидным полем, откуда формировались два противоположно направленных пучка ионов. Один из пучков до осаждения проходил через масс-спектрометр. Покрытия формировались при энергии ионов 3, 5 и 10 кэВ. Соотношение N<sub>2</sub> : C<sub>60</sub> варьировалось током ионов C<sub>60</sub> на подложку. Структура, состав и химические связи покрытий исследовались методами ПЭМ и РФЭС, механические свойства наноиндентированием. По данным ПЭМ при Ts <200°C, структура покрытий аморфная, Ts ≥200°C формируются фуллереноподобные структуры (ФС). Вблизи Ts ~300°C в ФС матрице появляются нанокристаллы с межплоскостными 0,527 и 0,366 нм. Увеличение N<sub>2</sub> : C<sub>60</sub>, приводит к появлению sp<sup>3</sup> фазы высокого давления CN, описанной в [1]. Эта фаза встроена в ФС и на дифракционной картине дает ряд размытых колец вблизи отражения (0002) графита. В этой же области Ts (~300°C), по данным РФЭС, соотношение sp<sup>3</sup>/sp<sup>2</sup> имеет локальный максимум. Во всем интервале Ts нанотвердость покрытий более 40 ГПа, что позволяет отнести их к алмазоподобным структурам.

Работа выполнена по теме Гос. задания, № гос. регистрации АААА-А19-119061890019-5, темкарта 00892019-007.

1. E. Stavrou et al//Chemistry of Materials, (2016) 28, 6925.

## ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ НА ФРАКТАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Б.Л. Оксенгендлер, Б.Р. Кутлимуротов, С.Е. Максимов, Х.Б. Ашууров  
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий  
им. У.А.Арифова АН Республики Узбекистан, Ташкент

В области радиационной физики твёрдых тел к настоящему времени стало ясно, что среди всех структурных свойств объектов особую роль играют наномасштабность, фрактальность, комбинированная малая размерность, хиральная симметрия и иерархическое строение. Важно, что наряду с изменением феноменологии, модификации коснулись и атомных перестроек [1]. В настоящей работе изучаются различные пути воздействия ионизирующего излучения заряженных частиц. Пусть фрактальная поверхность, содержащая выпуклые и вогнутые области, подвергается воздействию электронов, ионизирующих глубокие оболочки атомов поверхности. Тогда с сечением  $\sigma_d$  осуществляется кулоновский оже-взрыв [2]:

$$\sigma_d = \sigma_k \alpha_k \exp[-E_V / \hbar \omega_D]$$

где  $\sigma_k$  – сечение К-ионизации,  $\sigma_k$  – вероятность оже-каскада,  $E_V$  – локальная ширина валентной зоны,  $\omega_D$  – частота Дебая. Поскольку значение  $E_V$  определяется знаком локальной кривизны поверхности, то сечение процесса существенно различно для выпуклых и вогнутых областей, и имеет место сглаживание рельефа, т.е. это приводит к зависимости фрактальной размерности  $D_f$  от дозы  $J$ :  $dD_f/dJ < 0$ . Это явление характерно как для внешних, так и для внутренних поверхностей и лежит в основе множества эффектов (эффект Стеблера-Вронского [3], эффект лавинной десорбции и др.).

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Оксенгендлер Б.Л., Зацепин А.Ф. и др. //Поверхность. 2022. №6. С.53–63.
2. Oksengendler B.L., Ashirmetov A.X., Turaeva N.N. et al., //NIMB. 2022. V.512. P 66-74.
3. Ашууров Х.Б., Кутлимуротов Б.Р., и др. //Узбекский физический журнал. 2021. Т.23. №3. С.29-32.

## БАКТЕРИЦИДНОСТЬ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОК, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ ТАНТАЛА

Ф.Г. Нешов<sup>\*)</sup>, И.Н. Бажукова, Л.В. Викторов, Д.В. Райков  
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: neshov@mail.ru

Алмазоподобные углеродные пленки вследствие уникальных свойств в области биоцидности находят широкое применение в медицине и биологии. Используя наночастицы металлов, удалось значительно увеличить бактерицидные свойства пленок. В этом плане наиболее широко используются серебро и медь. В последнее время интерес исследователей привлек тантал. Он обладает высокой биосовместимостью, не уступая титану, однако в имплантации используется редко из-за трудностей в механической обработке и высокой стоимости. Наночастицы тантала также обладают высокой бактерицидностью, что и вызвало интерес исследователей [1].

В данной работе проведено исследование влияния легирования алмазоподобных пленок ионами тантала на их бактерицидные свойства. Пленки наносились импульсным ионно-плазменным методом на установке УВНИПА-1-001 путем распыления графитового катода (МПГ-6) с танталовыми вставками, занимающими 10 % поверхности катода. Пленки имели толщину 50±75 нм. В качестве подложки использовались покровные стекла, кремниевые пластины, алюминиевые фольги. Бактерицидность пленок исследовалась с помощью винных дрожжей штамма *Saccharomyces cerevesial*. Жизнеспособность клеток оценивалась методом количественного подсчета клеток в камере Горяева.

Бактерицидность пленок исследовалась также независимым качественным методом с помощью биосенсора «Эколюм» на основе штамма *E.coli*. Использовался водный раствор биосенсора в концентрации 1,5 мг/мл. Сопоставительный анализ кривых спада световых выходов позволил качественно определить действие легирования.

Таким образом, нами установлено, что легирование алмазоподобных пленок ионами тантала существенно увеличивает бактерицидность пленок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. George Frolov et al. Metal Nanoparticles of improving Bactericide Functionality of Usual Fiberic // *Nanomaterials* 2020 v.10, p.1724

## ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МУНТ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ.

А.Д. Шпорин\*, О.М. Марченко, А.П. Евсеев,

Е.А. Воробьева, Ю.В. Балакшин,

Д.К. Миннебаев, А.А. Шемухин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

Москва, Россия

\*e-mail: shporin.ad16@physics.msu.ru

Материалы с особыми функциональными характеристиками привлекают внимание исследователей в области нанотехнологий по всему миру. Изменение структуры и электрофизических свойств, например многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) под действием ионного облучения представляет собой актуальную задачу. Исходные МУНТ имеют низкое удельное сопротивление, которое сопоставимо с проводящими материалами. Во время облучения ионами происходит модифицирование наноструктуры, что существенно влияет на ее проводимость. Из-за большой площади поверхности МУНТ обладают очень высокой чувствительностью в отношении своих электронных свойств из-за высокой адсорбции материала, вызываемой на их поверхности, что делает их очень перспективными для разработки химических и биологических датчиков.

В данной работе проанализировано разупорядочивание структуры МУНТ, приводящее к изменению проводимости до и после облучения. Изучалось изменение вольтамперной характеристики пресованных МУНТ в зависимости от флюенса при различных конфигурациях расположения электродов. Сделаны выводы об изменении удельного сопротивления. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-72-10118.

## ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ КВАРЦЕВЫХ СТЕКОЛ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

Е.Ю. Зыкова, А.Е. Иешкин, Н.Г. Орликовская, Э.И. Рау,  
А.А. Татаринцев<sup>\*)</sup>

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: tatarintsev@physics.msu.ru

Изучение эффектов электризации диэлектриков имеет научный интерес и большое практическое значение. Например, радиационную зарядку следует учитывать при электризации поверхности космических аппаратов и в ядерной энергетике. Перспективные матрицы для иммобилизации радиоактивных отходов ядерного топливного цикла являются диэлектриками (стекла, керамики). Процесс их самооблучения неизбежно ведет к накоплению электрического заряда, что может приводить к кулоновскому взрыву или к другим явлениям, возникающим при высоких степенях электризации диэлектрических стекол [1]. Как было показано в работе [2], на процесс радиационной зарядки диэлектриков оказывает существенное влияние наличие ловушек для электронов, как изначально существующих в кристалле, так и создаваемых в процессе электронного облучения за счет механизмов допорогового дефектообразования. Целью представленной работы являлось экспериментальное изучение процессов зарядки и допорогового дефектообразования монокристаллического кварца. Для этого были проведены исследования эволюции потенциала зарядки, интегральной люминесценции, а также спектров катодолуминесценции в процессе их облучения электронами с энергией 1-20 кэВ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00083

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. M.I. Ojovan, B.E. Burakov, W.E. Lee // Jour. of Nucl. Mat., 2018, 501, 162–171.
2. Э.И. Рау, А.А. Татаринцев // ФТТ, 2021, т. 63, № 4, с. 483.

ЭЛЕМЕНТНЫЙ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТИ Si(111)  
ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ  $O_2^+$

Г.Х. Аллаярова<sup>1</sup>, Б.Е. Умирзаков<sup>2</sup>, А.К. Ташатов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Каршинский государственный университет, Карши, 180117 Узбекистан

<sup>2</sup>Ташкентский государственный технический университет,

Ташкент 100095 Узбекистан

e\*-mail: allayarova5030@mail.ru

На рис. 1 приведен масс-спектр отрицательных ионов для Si, имплантированного ионами  $O_2^+$  с  $E_0 = 1$  кэВ при дозе облучения  $D = D_n = 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$  где  $D_n$  - доза насыщения. Видно, что в спектре содержатся интенсивные пики  $SiO_2$ , субоксидов Si ( $SiO$  и  $Si_2O$ ) и несвязанных атомов Si и O. Наряду с этими пиками обнаруживаются малоинтенсивные пики различных примесных атомов, общая концентрация которых не превышает 0,1 ат. %[1-2].

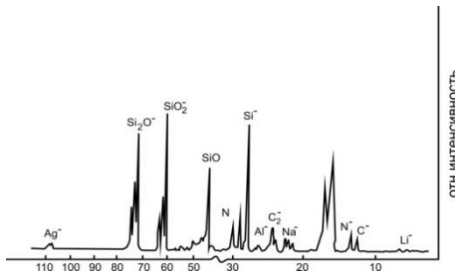


Рис. 1. Масс-спектр Si, имплантированного ионами  $O_2^+$  с  $E_0 = 1$  кэВ при  $D = 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , записанный при бомбардировке ионами  $Cs^+$  с  $E_0 = 6,7$  кэВ

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Tashmukhamedova, D.A., Yusupjanova M.B. Allayarova G.X. Umirzakov B.E // Tech. Physics, 2020. 46(10). P. 972-975  
<https://link.springer.com/article/10.1134/S1063785020100144>
2. Umirzakov B.E, Tashmukhamedova D.A., Ruzibaeva M.K, Djurabekova F.G., Donaev S.B.// J. Surf. Invest. X-Ray, Synchrotron and Neutron Tech.-2014 B-326 Pp. 322-325 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X14001670>



ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ  $O_2^+$  НА ЭЛЕМЕНТНЫЙ И  
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТИ Si (111)

Г.Х. Аллярова<sup>1</sup>, Файзиев М.М.<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Каршинский государственный университет, Карши, 180117 Узбекистан  
e-mail: allayarova5030@mail.ru

Каршинский инженерно-экономический институт,  
m.m.fayziyev1961@gmail.com

На рис. 1 приведены изменения по глубине общей концентрации O, и концентрации O образующих связи типа  $SiO_2$  и  $SiO_x$  ( $SiO + SiO_{0.5}$ ) для Si, имплантированного ионами  $O_2^+$  с  $E_0 = 1$  кэВ при  $D=6 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Видно, что кривые зависимости  $C_{SiO_2}(d)$  и  $C_{SiO_x}(d)$  проходят через максимум. Общая концентрация O до глубины 20-25 Å заметно меняет, из них до 70-75 ат.% образует химический связь с атомами Si. После прогрева при 900 К все атомы O и Si входят в химическую связь и образуется пленки  $SiO_2$  с достаточно хорошей стехиометрией.

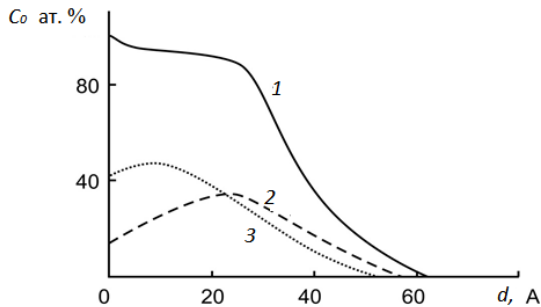


Рис.1. Зависимости  $C_o(d)$  для Si, имплантированного ионами  $O_2^+$  с  $E_0=1$  кэВ. 1-общая концентрация атомов O; 2 - концентрация O в оксиде  $SiO_2$ ; 3 - концентрация O в соединении  $SiO_x$  ( $SiO + SiO_{0.5}$ )

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tashmukhamedova, D.A., Yusupjanova M.B. Allayarova G.X. Umirzakov B.E // Tech. Physics., 2020. 46(10). P. 972-975 <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063785020100144>
2. Umirzakov B.E, Tashmukhamedova D.A., Ruzibaeva M.K, Djurabekova F.G., Donaev S.B.// J. Surf. Invest. X-Ray, Synchrotron and Neutron Tech.-2014 В-326 Pp, 322-325 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X14001670>

## АНАЛИЗ НАНОРАЗМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ Zr/Nb ПОСЛЕ ПРОТОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

А. Ломыгин<sup>1)</sup>, Р.С. Лаптев<sup>1)</sup>, А.Г. Кобец<sup>2)</sup>, К.Siemek<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

<sup>2)</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В процессе исследования проводилось протонное облучение наноразмерных металлических слоев Zr/Nb с энергией 900 кэВ [1]. Проводился анализ распределения слоев в НМС Zr/Nb до и после облучения протонами, также анализировалась дефектная структура НМС Zr/Nb до и после облучения протонами с помощью пучковой позитронной спектроскопии с переменной энергией (см. Рис. 1).

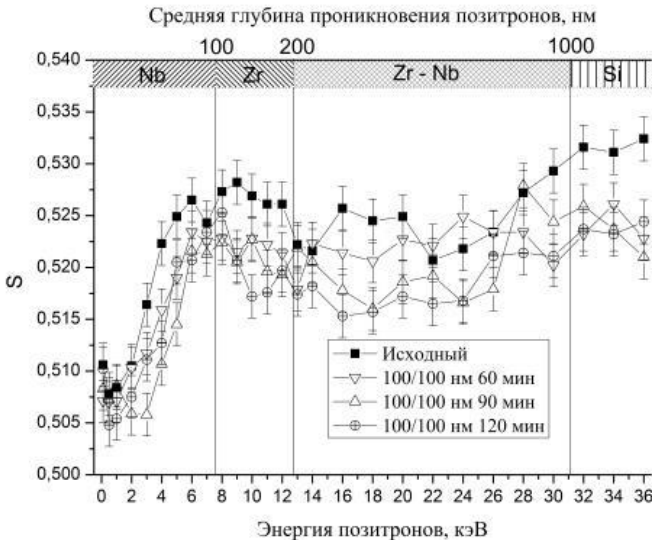


Рис. 1. График зависимости S параметра от энергии позитронов для НМС Zr/Nb с толщиной слоев  $100 \pm 10$  нм

### ЛИТЕРАТУРА

1. Callisti M., Lozano-Perez S., Polcar T. Structural and mechanical properties of  $\gamma$ -irradiated Zr/Nb multilayer nanocomposites //Materials Letters. – 2016. – Т. 163. – С. 138-141.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РЕЗЕРФОРДОВСКОГО ОБРАТНОГО  
РАССЕЯНИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПЛЕНОК  
ОКСИДА ОЛОВА, ЛЕГИРОВАННЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫМИ  
МЕТАЛЛАМИ

А.И. Кругляк<sup>1,\*</sup>, Т.Ю. Зеленьяк<sup>1</sup>, P.L. Tuan<sup>1,2</sup>,  
А. С. Дорошкевич<sup>1</sup>, В. К. Ксеневиц<sup>3</sup>, В. А. Доросинец<sup>3</sup>,  
М. А. Самарина<sup>3</sup>, Д. В. Адамчук<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия  
<sup>2</sup>Вьетнамский институт атомной энергии, Ханой, Вьетнам  
<sup>3</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь  
\*) e-mail: Anastasiya.Kruglyak@nf.jinr.ru

В современном материаловедении для исследования элементного состава и химических неоднородностей многослойных планарных структур, процессов окисления и т.п. используются неразрушающие методы анализа, в частности, метод Резерфордовского обратного рассеяния RBS [1].

Методом RBS на пучках ионов гелия (Ускоритель ЭГ-5, ОИЯИ, г. Дубна, РФ) исследован элементный состав пленок оксидов олова, легированных атомами Co, Ni и Fe.

Синтез легированных ферромагнитными металлами (Co, Ni и Fe) пленок SnO проводился методом магнетронного распыления олова с последующим окислительным отжигом на воздухе (БГУ, Минск, Беларусь).

Установлено, что содержание атомов Sn, Ni, Co, Fe и O в пленке составляет 34,0, 4,0, 4,4, 0,8 и 56,8 атомных процента соответственно. Показано, что атомы Ni и Co распределены равномерно по глубине пленки, а наибольшая концентрация атомов Fe (0,7 -0,9 ат. %) наблюдается на глубине ~ 30 нм. Установлено также, что наибольшая концентрация атомов Sn наблюдается вблизи поверхности пленки на глубине ~ 6 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Kramchenkov, А. А. Drozdenko, М. Zakharets//Metallofizika I noveishie tekhnologii, 2008, 30: 453-458.



**Секция V**

**РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В НАНОСТРУКТУРАХ (НАНО- И БИО-  
ОБЪЕКТЫ). ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ,  
СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ**



СПЕКТР КОГЕРЕНТНОГО ВУФ ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО  
ЭЛЕКТРОНАМИ 5.7 МЭВ В МНОГОСЛОЙНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ  
СТРУКТУРЕ

С.Р. Углов<sup>\*)</sup>, А.В. Вуколов, М.В. Шевелев  
Томский политехнический университет, г. Томск, Россия  
<sup>\*)</sup> e-mail: uglov@tpu.ru

Структуры типа многослойных рентгеновских зеркал, могут быть эффективными источниками вакуумного ультрафиолета и ультрамягкого рентгеновского излучения (ВУФ/УМР) с настраиваемой энергией излучения /1,2/. Полоса излучения определяется периодом многослойной структуры, количеством слоев и углом наклона структуры  $\theta_0$  относительно направления электронного пучка. Основной вклад в излучение создается дифракцией переходного излучения (ДПИ) и когерентным излучением периодической структуры мишени возбужденной электронным пучком - аналогом параметрического рентгеновского излучения в кристаллах (ПРИ). В докладе представлены результаты расчетов угловых и спектральных свойств ДПИ и ПРИ, генерируемых электронами 5.7 МэВ в структуре, состоящей из 50 пар слоев молибдена и кремния [Mo/Si]<sup>50</sup> (см. Рис.1) и рассмотрены подходы для выделения вкладов ДПИ и ПРИ в эксперименте. Работа поддержана РНФ грант - № 23-22-00187.

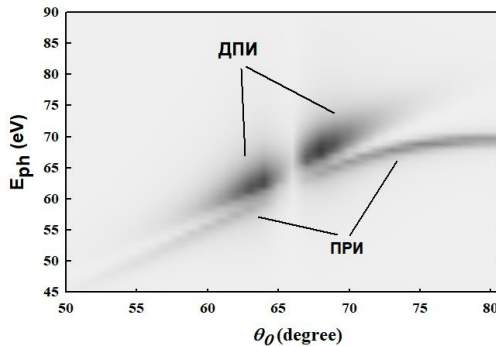


Рис.1 Вклады ПРИ и ДПИ в зависимости энергии фотонов  $E_{ph}$  и угла наклона мишени в окрестности  $\theta_0=67.5^\circ$ .

ЛИТЕРАТУРА

1. N. Nasonov, V. Kaplin, S. Uglov, V. Zabaev, M. Piestrup, C. Gary, //Nucl. Instrum. and Meth., 2005, B227, 41.
2. С.Р.Углов, В.В. Каплин, Л.Г. Сухих, А.В.Вуколов // Письма в ЖЭТФ, 2014, 8, 561.

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЕННОГО И ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МОДЕЛЬНЫЕ БИОМАТЕРИАЛЫ

Н.В. Илясова<sup>1</sup>, О.В. Кондракова<sup>2</sup>, А.И. Кудюкин<sup>2</sup>, Е.Н. Моос<sup>2</sup>, М.Ю. Орлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Рязанский государственный университет им. И.П.Павлова, Рязань, Россия

<sup>2</sup>Рязанский государственный университет имени С.А.Есенина, Рязань, Россия

E-mail: kov0177@mail.ru

Изучение воздействия энергетических ионных потоков на поверхность важно, например, в практических задачах материаловедения, включая физическое материаловедение биотканей и биоматериалов. Существует проблема совместимости живого организма с чужеродными материалами, например, при протезировании костей и суставов, фиксации брекет-систем. Формализуя – это аспекты формирования трёхслойной структуры (костное образование организма, связующее вещество, металл или керамика). В работе представлены результаты сопоставительного исследования воздействия энергетических потоков плазмы и лазерного излучения примере модельных образцов брекет-систем (типа нержавеющей стали марки 17-4 и керамических - поликристаллического оксида алюминия) для увеличения сцепления слоев брекет-систем и эмали зуба. Плазменным источником водородной плазмы нам служил аппарат «Мультиплаз-2500». Лазерное излучение обеспечил CO<sub>2</sub> (10,6 мкм при средней мощности излучения 80 Вт). Рельеф поверхностей изучался методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Шероховатость исследуемой поверхности начального состояния поверхности металлического брекета составила 112,3 - 118,1 нм, а керамического - 64 нм.

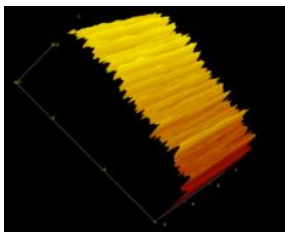


Рис.1

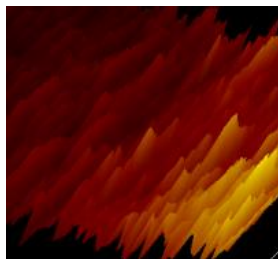


Рис.2

Средняя шероховатость при однократной обработке металлического брекета водородной плазмой (см.Рис.1) составила 184,4 нм, керамического - 97,4 нм. Обработка образцов CO<sub>2</sub>-лазером даёт 180 нм и 155,1 нм соответственно (см.Рис. 2). Воздействие плазмы и излучение CO<sub>2</sub>- лазера дают сопоставимые результаты шероховатости поверхности, что обеспечивает увеличение прочности сцепления в трехслойных композициях.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Черныш В.С. Иешкин А.Е., Киреев Д.С., Миннебаев Д.К., Скрылева А.Е., Сенатулин Б.Р. // ЖТФ, 2023, вып.12. С. 1943 – 1950.
2. Илясова Н.В. и др. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2022. Т. 15. № 1. — С. 62–69.



РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ДЕФЕКТНОЙ  
СТРУКТУРЫ ОБЛУЧЕННЫХ СЛОЕВ ОКСИДА КРЕМНИЯ НА  
НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ПОСТИМПЛАНТАЦИОННОГО ОТЖИГА

Е.В. Окулич<sup>1,\*</sup>), В.И. Окулич<sup>2)</sup>, Д.И. Тетельбаум<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>2)</sup> НИУ филиал РАНХиГС, Нижний Новгород, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: eokulich@nifti.unn.ru

Представлен алгоритм оценки эволюции дефектных структур на начальном этапе отжига ионноимплантированных слоев аморфного оксида кремния методом молекулярной динамики, позволяющий определить их количественный и структурный состав.

Фиксируемые для разных времен отжига атомные координаты использовались для визуализации структуры, расчёта локальных плотностей и радиальной функции распределения кремния и кислорода.

Приведены результаты моделирования процесса отжига при температуре 1500 К оксида кремния, облученного ионами  $\text{Si}^+$  и  $\text{Xe}^+$  с разными параметрами, показавшие существенную зависимость от вида иона.

Предложенная методика может быть использована и для других материалов.

Полученные результаты могут объяснить нестабильность электрофизических характеристик мемристоров на основе оксидных материалов [1].

Работа выполнена в рамках государственного задания по созданию новых лабораторий для электронной промышленности (№ FSWR-2022-0009).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Окулич Е.В., Окулич В.И., Тетельбаум Д.И. // ПЖТФ, 2020, т. 1, с. 24.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ГИБРИДНЫХ ПЕРОВСКИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Е.Д. Рубцова<sup>1,\*</sup>, И.А. Каменских<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>\*</sup>) e-mail: rubtsova-liza98@yandex.ru

В последнее десятилетие гибридные органо-неорганические галогениды свинца со структурой перовскита (общая формула  $APbX_3$ ,  $X = Cl, Br, I$ ) активно исследуются как перспективные материалы для фотовольтаики. В то же время уникальные характеристики гибридных перовскитов позволяют рассматривать множество альтернативных применений этих материалов. В частности, для детектирования ионизирующего излучения большой интерес представляет субнаносекундная кинетика затухания люминесценции гибридных перовскитов, которая делает их перспективной основой для создания сцинтилляторов с высоким временным разрешением [1].

В данной работе представлены результаты исследования люминесцентных свойств монокристаллов концентрационной серии гибридных органо-неорганических перовскитов:  $MAPbBr_xCl_{3-x}$  ( $x = 0, 0.75, 0.3, 0.5, 2.7, 3$ ) при возбуждении синхротронным излучением рентгеновского и вакуумно-ультрафиолетового (ВУФ) диапазона в широком диапазоне температур. Измерения проводились на станциях P23 и P66 немецкого центра синхротронных исследований DESY.

Были измерены температурные зависимости кинетики и спектров люминесценции перовскитов. Определены времена затухания экситонной люминесценции материалов:  $<1$  нс во всем исследованном диапазоне температур. К недостаткам перовскитов можно отнести их значительное температурное тушение и нестабильность.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, грант № 075-15-2021-1353 и РНФ № 20-02-00688.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Birowosuto M.D., Cortecchia D., Drozdowski W., et al.// Sci Rep., 2016, Vol. 6, №1, P. 37254.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТОДАМИ EXAFS- И EXELFS-СПЕКТРОСКОПИИ.

И.К. Аверкиев<sup>1,\*</sup>, О.Р. Бакиева<sup>1</sup>), В.В. Кривенцов<sup>2</sup>)<sup>1</sup>) УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия<sup>2</sup>) Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

\*) e-mail: averkiev1997@mail.ru

Переход от «классических» материалов к наноразмерным материалам, приводит к появлению изменений в различных масштабах, начиная от модификации структуры и заканчивая изменениями на атомном уровне. Ведущую роль в формировании функциональных свойств наноматериалов играет ближайшее атомное окружение. Методы с использованием рентгеновского излучения являются мощными инструментами изучения локального окружения вокруг атома определенного типа. Среди методов выделяется спектроскопия протяженной тонкой структуры рентгеновского поглощения (EXAFS). В основе метода лежит регистрация когерентного рассеяния фотоэлектрона на локальном окружении возбуждаемого атома. Процессы когерентного рассеяния электрона на локальном окружении атома возникают и при возбуждении потоком моноэнергетичных электронов. Спектроскопия протяжной тонкой структуры потерь энергии электронов (EXELFS) является EXAFS-подобным методом с использованием электронного зонда, который реализован на лабораторном оборудовании. Обычно в режиме отражения от поверхности образца регистрируют спектры энергетических потерь электронов за L и M краями возбуждения металлов и K краями легких элементов.

В работе продемонстрировано совместное исследование локальной атомной структуры Ti-содержащих материалов (Ti, Ti, Ti<sub>2</sub>AlC) методами EXAFS- и EXELFS-спектроскопии. Совместное использование методов позволяет получать подробную информацию о локальном атомном окружении как металла, так и легкого элемента.

Работа выполнена по плану НИР №121030100002-0. Исследования EXELFS проводились в ЦКП «Поверхность и новые материалы» УдмФИЦ УрО РАН. EXAFS-исследования проводились в ЦКП «СЦСТИ» на базе новосибирского комплекса ВЭПП-4-ВЭПП-2000, ИЯФ СО РАН.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ УРАНИЛА НА ПРИРОДНЫХ  
СОРБЕНТАХ ПО ДАННЫМ EXAFS

А.Д. Крот<sup>1\*)</sup>, А.Л. Тригуб<sup>2)</sup>, И.Э. Власова<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>1)</sup> НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

\*) e-mail: anna.d.krot@gmail.com

Некорректное обращение с радиоактивными отходами в прошлом привело к формированию радиоактивно загрязненных участков природных территорий. Миграция урана в окружающей среде представляет угрозу для живых организмов. Поэтому важным является исследование поведения урана в природных условиях, в частности, его взаимодействие с окружающими минералами.

Целью работы являлось изучение структур поверхностных комплексов с природными сорбентами в масштабе Ангстрем путём анализа протяженной тонкой структуры спектров рентгеновского поглощения (EXAFS). С помощью метода спектроскопии рентгеновского поглощения были определены параметры локального окружения урана в комплексах на органических сорбентах, гетите, глинистых минералах разной структуры, кальците и арагоните, в широком диапазоне рН среды и концентраций U.

В зависимости структуры комплекса и типа сорбента, поверхностные комплексы обладают набором характерных координационных сфер, что делает возможным идентификацию комплексов в сложных загрязненных природных объектах /1/.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 19-73-20051. Авторы выражают благодарность д.х.н., проф. К. Квашиной и к.г.-м.н. Е. Базаркиной за помощь с измерениями в Европейском центре синхротронных исследований.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А.Д. Крот, И.Э. Власова, А.Л. Тригуб, //MRS Advances, 2022, 102, 303-310.

## ОБЗОР ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ РОССИИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЦЕЛЕЙ

М.М. Токтаганова, Д.А. Шкитов<sup>\*)</sup>,  
Томский политехнический университет, Томск, Россия  
<sup>\*)</sup> e-mail: shkitovda@tpu.ru

В настоящее время в литературе отсутствует сколько нибудь структурированная информация или обзоры об исследовательских (не промышленных и не медицинских) ускорителях электронов в России. В нашей работе предпринята попытка создания такой базы данных /1/ существующих установок. Актуальность исследования обусловлена трудностями, связанными с процедурой выезда за рубеж российских научных групп. База данных включает в себя информацию о расположении и принадлежности установок, краткое описание сфер их применения на текущий момент, и характеристиках генерируемых пучков. Обзор является расширенным комментарием к созданной базе, а также логически продолжает работу /2/. Кроме того, в работе анализируются перспективы проведения экспериментальных исследований различных типов поляризационного излучения на рассматриваемых ускорителях. Приводятся результаты моделирования спектральных и угловых распределений переходного излучения.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Таблица электронных ускорителей в России // [https://portal.tpu.ru/SHARED/s/SHKITOVDA/eng/files/files\\_\(14.02.2023\)](https://portal.tpu.ru/SHARED/s/SHKITOVDA/eng/files/files_(14.02.2023))
2. Шкитов Д.А., Токтаганова М.М. // В сб. материалов 18-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Молодежь и современные информационные технологии, Томск, ТПУ, 2021, с. 172.

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА РЕФЛЕКТОМЕТРЕ  
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ РЕМУРВ. Д. Жакетов<sup>1,\*</sup><sup>1)</sup> Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия<sup>\*</sup> e-mail: zhaketov@nf.jinr.ru

В настоящее время активно исследуются эффекты близости на границе раздела двух сред. Особый интерес представляют двумерные низкоразмерные структуры со сверхпроводящими и ферромагнитными свойствами, в которых реализуется взаимодействие двух антагонистичных друг другу параметров порядка. Одним из наиболее эффективных методов исследования магнетизма тонких плёнок является рефлектометрия поляризованных нейтронов, позволяющая получить изотопные и магнитные профили по глубине с нанометровым разрешением. Рефлектометр поляризованных нейтронов РЕМУР, располагающийся на 8м канале импульсного реактора ИБР-2 (Дубна), является одним из наиболее светосильных рефлектометров в мире с потоком нейтронов на образце  $\Phi = 3 \cdot 10^5 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . Данный рефлектометр является времяпролётным с рабочим диапазоном длины волны нейтрона  $\lambda \approx 1 - 15 \text{ \AA}$ . На рефлектометре РЕМУР проводились низкотемпературные исследования эффектов близости в сверхпроводяще-ферромагнитных системах [1-2] и редкоземельных пленках с нетривиальным магнитным упорядочением [3].

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В.Д. Жакетов и др. // ЖЭТФ, 2019, том 156, вып. 2(8), стр. 310-330
2. Yu.N. Khaydukov et al. // Phys. Rev. B, 2019, 99, 140503(R)
3. Д.И. Девятериков и др. // Поверхность, 2022, № 10, стр. 24-28

CRYSTAL STRUCTURE OF THE LEPTOTHRIX BIO BACTERIA.  
LEPTOTHRIX AS ABSORPTION OF HEAVY METALS AND NATURAL  
RADIOACTIVE ELEMENTS

D.M. Mirzayeva<sup>1,2,\*</sup>, S.P. Kaplina<sup>1,2</sup>, M.V. Gustova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dubna State University, Dubna, Moscow distr., Russian

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow distr., Russian  
dunyamirzayeva@gmail.com

At present, due to the increase in the anthropogenic load on the environment, the search for new natural sorbents for wastewater treatment both in the natural environment and under production conditions becomes relevant. Methods for cleaning the environment using microorganisms are of great interest in solving scientific and technological problems. Iron-forming bacteria of the genus *Leptothrix* are of great interest, since during their growth they produce extracellular formations containing iron oxides and oxyhydroxides, which can be used for environmental purposes. It is from this aspect that structural analyzes were performed on the *Leptothrix*. Structural characterization and phase composition of the samples was carried out by X-ray diffraction (XRD). The XRD measurements were done at 40 mA current and 40 kV voltage at room temperature on EMPYREAN Cu LFF DK408191 diffractometer, with  $\text{CuK}\alpha$  radiation,  $\lambda = 1.540598 \text{ \AA}$ . For Rietveld analysis of X-ray and neutron diffraction spectra, the FullProf software package was employed. Figure 1 shows the X-ray diffraction spectrum of *Leptothrix* and Rietveld analysis performed using the FULLPROF software package.

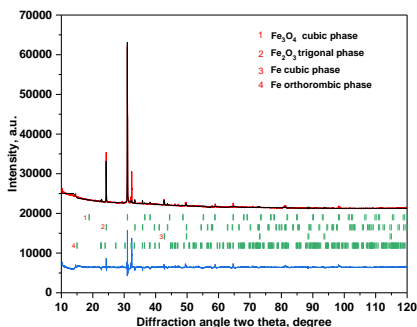


Figure 1. X-ray diffraction and Rietveld fit of the *Leptothrix*.

( $542.36139 \text{ \AA}^3$ ), ( $297.01447 \text{ \AA}^3$ ), ( $49.10815 \text{ \AA}^3$ ) and ( $726.02924 \text{ \AA}^3$ ) crystal volume was found for *Leptothrix*. All peaks found are consistent with literature results. Experimental results show that *Leptothrix* is formed in cubic (Fd-3m) and trigonal (R-3c) space groups with lattice parameters  $a=b=c=8.1551 \text{ \AA}$ , and  $a=b=5.01140 \text{ \AA}$ ,  $c=13.65619 \text{ \AA}$ , respectively. At the same time, Fe with cubic and orthorhombic lattice parameters  $a=b=c=3.66200 \text{ \AA}$ , and  $a=b=5.54080 \text{ \AA}$ ,  $c=23.64880 \text{ \AA}$  was determined in (Fm-3m) and (I bam) space groups

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ СКОЛЬЗЯЩЕМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Л.А. Жилияков<sup>1)</sup>, В.С. Куликаускас<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

e-mail: zhiliakovla@mail.ru

При протяженном (по направлению распространения) скользящем взаимодействии пучков протонов, прижимаемых к плоской диэлектрической поверхности внешним электрическим полем, ускоренные протоны не испытывают ионизационных потерь энергии /1/. При взаимодействии электронов со стенками диэлектрического капилляра также наблюдается бесстолкновительное прохождение пучков через канал /2/. Согласно модели, предложенной в /3/ в поперечном электрическом поле заряженные частицы пучков, при протяженном скользящем взаимодействии с диэлектрической поверхностью, совершают колебательные движения в направлении поперек направления распространения пучка. При этом они движутся с поперечным ускорением и, следовательно, такие пучки должны генерировать электромагнитное излучение.

Оценка по формуле Лармора показывает, что мощность электромагнитного излучения пучка электронов с током 100 мкА при поперечном поле  $5 \cdot 10^7$  В/м должна составлять около 1 нВт.

Таким образом, при протяженном скользящем взаимодействии с диэлектрической поверхностью пучки ускоренных электронов, прижимаемые внешним электрическим полем к диэлектрической поверхности, должны являться источником электромагнитного излучения.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Л.А. Жилияков, А.В. Костановский, Г.А. Иферов, В.С.Куликаускас, Г.П. Похил, И.В. Швей // Поверхность, 2002, №11, С.65.
2. N.Stolterfoht, Y. Yamazaki // Physics Reports, 2016, V.629, P.1.
3. Л.А.Жилияков, В.С.Куликаускас // Поверхность. 2022, №6, с.71



НАКОПЛЕНИЕ И СТИРАНИЕ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОГО  
ЗАРЯДА В МОП-СТРУКТУРАХ

Д.В. Андреев\*)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал,  
Калуга, Россия

\*) e-mail: dmitrii\_andreev@bmstu.ru

В данной работе изучены процессы накопления и стирания радиационно-индуцированного заряда в структурах металл-оксид-полупроводник (МОП). Накопление радиационно-индуцированного заряда изучалось при облучении структур  $\alpha$ -частицами, протонами и гамма-излучением [1]. Исследовано влияние сильнополевой инжекции электронов на появление и последующую эволюцию радиационно-индуцированных зарядов и дефектов в тонких диэлектриках МОП-структур. Определены режимы сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик, повышающие его дозовую чувствительность, а также режимы, позволяющие стирать большую часть радиационно-индуцированного положительного заряда при минимальной деградации оксида и его границы с полупроводником.

Предложена модель, описывающая процесс накопления и стирания радиационно-индуцированного положительного заряда в пленке оксида, в том числе и при сильнополевой инжекции электронов. Проведенные исследования зарядовых процессов, протекающих в термических пленках диоксида кремния МОП-структур при воздействии ионизирующих излучений и сильнополевой туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции электронов, представляет большой интерес как с точки зрения эксплуатации МОП приборов, так и при разработке МОП сенсоров радиационных излучений.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A., // , Sensors, 2020, v.20, is.8, p.2382(1-11).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННО- И ИНЖЕКЦИОННО-  
ТЕРМИЧЕСКИХ ОБРАБОТОК НА МОДИФИКАЦИЮ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК МДП-СТРУКТУР

В.В. Андреев<sup>\*)</sup>, С.А. Корнев, А.И. Власовский  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал,  
Калуга, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: vladimir\_andreev@bmsu.ru

В данной работе проведено исследование влияния радиационно- и инжекционно-термических обработок на модификацию структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), используемых в современных микросхемах и сенсорах радиационных излучений. В качестве ионизирующего излучения использовались электроны, протоны и гамма-излучение.

Установлено, что процессы модификации и деградации тонких, наноразмерных диэлектрических пленок МДП-структур и границы раздела с полупроводником, наблюдающиеся при инжекционно-термической обработке (ИТО) /1/, во многом аналогичны процессам, протекающим при радиационно-термической обработке (РТО), и, следовательно, РТО, используемая для улучшения качества диэлектрических пленок, может быть заменена на ИТО, как более простой метод, позволяющий контролировать изменение зарядового состояния МДП-структур в процессе обработки. Показано, что проведение как РТО, так и ИТО, позволяет за счет модификации подзатворного диэлектрика повышать надежность МДП-приборов. Показано, что величина заряда, инжектированного в диэлектрик, и напряженность электрического поля, при которой проводится инжекция, являются основными параметрами, определяющими эффективность инжекционно-термической обработки.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Андреев В.В., В.М. Масловский, Столяров А.А., // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2020, №3, с. 53-57.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ  
ДИЭЛЕКТРИКОВ НА ОБЛУЧЕНИЕ БЫСТРЫМИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИР.А. Рымжанов<sup>1,2\*)</sup>, А.Е. Волков<sup>3,4)</sup><sup>1)</sup> Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан;<sup>2)</sup> ОИЯИ, Дубна, Россия;<sup>3)</sup> ФИАН, Москва, Россия;<sup>4)</sup> НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия;

\*) e-mail: rymzhanov@jinr.ru

В настоящей работе оригинальная мультимасштабная модель применялась для описания структурных повреждений в нанокристаллических диэлектриках, облученных быстрыми тяжелыми ионами, тормозящимися в режиме электронных потерь энергии. Подход объединяет Монте-Карло код TREKIS [1], отслеживающий возбуждение электронов и передачу энергии атомам, с молекулярной динамикой, моделирующей релаксацию возбужденной решетки [2] в нанометрической окрестности траектории иона (трек). В работе анализируется и сравнивается отклик на облучение аморфизируемых и неаморфизируемых нанокристаллических мишеней. Рекристаллизация поврежденной области в треке, наблюдаемая в неаморфизируемых MgO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, значительно влияет на границы зерен, что приводит к объединению и укрупнению наночастиц [3]. Сильный нагрев и расширение материала в центральной части трека может привести к образованию пустот вблизи границ зерен. Подобно массивным мишеням, пролет тяжелых ионов в аморфизируемом образце практически не влияет на морфологию зерен, формируя аморфные треки. Показано, что наличие локальных напряжений в зернах может влиять на размеры формируемых треков.

Исследование финансировалось Министерством образования и науки Республики Казахстан (грант AP09259476).

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. N.A. Medvedev et al. // Journal of Physics D, 2015, 48, 355303
2. R.A. Rymzhanov et al. // Scientific Reports, 2019, 9, 3837
3. R.A. Rymzhanov et al. // Computational Material Science, 2023, *in press*.

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ НАКОПЛЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ  
ПОВРЕЖДЕНИЙ В  $\text{CeO}_2$  КЕРАМИКАХ ДОПИРОВАННЫХ  $\text{Y}_2\text{O}_3$ Р. Рспаев<sup>1)</sup>, А.Л. Козловский<sup>1,2)</sup><sup>1)</sup> Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана,  
Казахстан<sup>2)</sup> Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан<sup>\*)</sup> e-mail: artem88sddt@mail.ru

На сегодняшний день одним из перспективных решений в области повышения степени выгорания ядерного топлива и снижения долгоживущих ядерных отходов является использование нового типа топлива в основе которого лежит технология применения инертных матриц, в которых располагается ядерное топливо. Так называемое, дисперсное ядерное топливо по оценкам экспертов позволит значительно увеличить сроки эксплуатации ядерного топлива за счет повышенной устойчивости инертных матриц на основе тугоплавких соединений, а также увеличить степень выгорания за счет увеличения срока использования, а также повышения температуры активной зоны.

В работе представлены результаты влияния облучения тяжелыми ионами  $\text{Kr}^{15+}$  на изменение прочностных и теплофизических параметров оксидных керамик на основе  $\text{CeO}_2$  допированных  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . В ходе проведенных исследований установлено, что добавление в состав  $\text{CeO}_2$  керамик допанта  $\text{Y}_2\text{O}_3$  приводит к увеличению устойчивости к растрескиванию при однократном сжатии, что способствует увеличению сопротивляемости радиационному воздействию и последующему охрупчиванию приповерхностного поврежденного слоя. Полученные результаты испытаний на термоустойчивость облученных образцов в ходе циклических испытаний показали, что допирование  $\text{Y}_2\text{O}_3$  с концентрациями 0.10 и 0.15 моль приводит к увеличению устойчивости к термическому шоку оксидных керамик при циклических испытаниях.

СИНТЕЗ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ КЕРАМИК  $ZrO_2 - CeO_2$  С  
ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Н.А. Сайлауханов<sup>1)</sup>, Ш.Г. Гиниятова<sup>1)</sup>,  
А.Л. Козловский<sup>1,2)</sup>

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

<sup>2)</sup> Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан

<sup>\*)</sup> e-mail: artem88sddt@mail.ru

Одним из перспективных видов материалов для ядерного топлива являются композитные керамики на основе тугоплавких оксидных соединений, в частности оксида церия, алюминия, циркония, бериллия, магния и т.д. Интерес к данным типам композитов обусловлен в первую очередь большими перспективами использования их для создания дисперсного ядерного топлива, способного работать при повышенных температурах, в условиях больших механических и радиационных нагрузок. При этом на сегодняшний день большое внимание уделяется разработкам способов получения данных композитов, а также определению их радиационной стойкости и устойчивости к радиационно-индуцированному охрупчиванию и последующей деградации.

В этой связи использование метода механохимического синтеза позволяет получать композитные керамики с различным фазовым и элементным составом, а также различными размерами зерен, путем варьирования условий синтеза. В ходе проведенных исследований с применением метода механохимического синтеза были получены композитные  $ZrO_2 - CeO_2$  керамики, обладающие повышенной радиационной устойчивостью и высокими значениями теплофизических и прочностных параметров, в сравнении с аналогичными керамиками на основе диоксида циркония. Повышенная радиационная стойкость данных керамик обусловлена в первую очередь созданием двухфазных структур, наличие которых обуславливает дополнительные граничные эффекты, приводящие к снижению скорости накопления и агломерации радиационных дефектов в виде вакансий и междоузлий.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТОНКИХ  $\text{CuBi}_2\text{O}_4$  ПЛЕНОК

М.Е. Калиекперов<sup>1)</sup>, М.Т. Идинов<sup>2)</sup>, А.Л. Козловский<sup>1,3)</sup>

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

<sup>2)</sup> НАО «Университет им. Шакарима города Семей»,  
Семипалатинск, Казахстана

<sup>3)</sup> Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан

<sup>\*)</sup> e-mail: artem88sddt@mail.ru

Основной целью данного исследования являлось определение эффективности применения тонких  $\text{CuBi}_2\text{O}_4$  пленок для экранирования рентгеновского излучения, а также определения применимости данных пленок в качестве защитных экранирующих материалов.

Эффективность экранирования рентгеновского излучения с помощью полученных методом электрохимического синтеза тонких  $\text{CuBi}_2\text{O}_4$  пленок была оценена путем проведения сравнительного анализа изменения интенсивности дифракционных рефлексов подложки, с нанесенными на нее экранирующими пленками. Согласно полученным данным, варьирование разности прикладываемых потенциалов при получении  $\text{CuBi}_2\text{O}_4$  пленок с 2.5 до 3.0 В, приводящее к вариации элементного состава пленок приводит к увеличению эффективности экранирования с 64 до 82 %. При этом толщина экранирующих пленок составила не более 1.5 мкм. Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что изменение соотношения компонент в составе пленок, происходящее в случае вариации условий синтеза, позволяет увеличивать эффективность экранирования при той же толщине защитных экранов. При этом согласно данным рентгенофазового анализа было установлено, что вариация условий синтеза не приводит к существенным изменениям фазового состава синтезируемых пленок, а основной фазой является тетрагональная фаза  $\text{CuBi}_2\text{O}_4$  с пространственной сингонией  $R4/ncc$  (130).

СОСТАВ И СТРУКТУРА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ NiCoFeCr и NiCoFeCrMn, ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ОБЛУЧЕННЫХ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ КРИПТОНА И ГЕЛИЯ

В.В. Углов<sup>1\*)</sup>, И.А. Иванов<sup>2)</sup>, С.В. Злоцкий<sup>1)</sup>, А.Е. Рыскулов<sup>2)</sup>,  
Б.С. Аманжулов<sup>2)</sup>, М.В. Колобердин<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Институт ядерной физики МЭ РК, Нур-Султан, Казахстан

\*) e-mail: uglov@bsu.by

Высокоэнтропийные (ВЭСы) сплавы NiCoFeCrMn и NiCoFeCr были получены методом дуговой плавки с последующей гомогенизацией с использованием металлов высокой чистоты (>99,9%). Далее проводился отжиг на протяжении 24 ч и 72 ч при температуре 1150°C с промежуточной холодной прокаткой до 85 % сокращения толщины.

Микроскопические исследования полученных образцов показали, что они являются крупнозернистыми (размер зерен 100-80 мкм) однофазными сплавами с ГЦК-решеткой с околоэквиатомным составом и однородным распределением элементов по поверхности и глубине. Выявлено, что внутренние напряжения в ВЭСах являются растягивающими и составляют 100-200 МПа.

Методами рентгеноструктурного анализа и растровой электронной микроскопии установлено, что морфология поверхности и фазовый состав образцов являются устойчивыми к последовательному облучению низкоэнергетическими ионами криптона (280 кэВ, флюенс  $5 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup>) и гелия (40 кэВ, флюенс  $2 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup>).

Обнаружено, что последовательное облучение ионами криптона и гелия приводит к образованию сжимающих напряжений. Выявлен рост уровня напряжений с дозой облучения, как ионами гелия, так и криптона. Выявлены закономерности изменения макронапряжений и плотностей дислокаций в зависимости от типа иона, дозы и последовательного облучения ионами криптона и гелия.

В работе обсуждаются механизмы образования и роста радиационных дефектов в ВЭСах и влияния их на уровень внутренних напряжений.

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP14872199).

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА РАЗМЕР ЗЕРНА И ТУКСТУРУ В ФОЛЬГАХ  
Мо и Та

В.А. Андрианов<sup>1\*</sup>), К.А. Бедельбекова<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

<sup>2)</sup> Институт Ядерной Физики, Алматы, Казахстан

<sup>\*)</sup> e-mail: andrva22@mail.ru

Физика радиационных повреждений важна при эксплуатации существующих ядерных реакторов и при создании новых ядерных и термоядерных устройств. Тугоплавкие металлы Мо и Та и сплавы на их основе широко используются в различных ядерных устройствах. В настоящей работе радиационные повреждения в фольгах Мо и Та создавались при имплантации ионов <sup>57</sup>Fe. Глубина имплантации составила около 600 нм, концентрация первичных дефектов оценивалась в 100-120 СНА. На облученных образцах были проведены исследования методом Мессбауэровской спектроскопии на ядрах <sup>57</sup>Fe и методом EXAFS на K $\alpha$ -линии Fe [1]. Оба метода позволили получить данные о локализации атомов Fe в условиях высокодозного облучения.

В настоящей работе представлены рентгено-дифракционные исследования этих образцов, которые дают информацию о кристаллической решетке в целом. Анализировались параметры кристаллической решетки, уширение дифракционных линий и их интенсивность с точки зрения текстуры. Измерения проводились как со стороны облученной поверхности фольг, так и с обратной необлученной стороны. Показано, что фольги Мо и Та текстурированы с ориентацией кристаллографических плоскостей {100} в плоскости фольги с обеих сторон. Облучение не оказывало влияния на текстуру образцов, но вызывало уменьшение размеров кристаллических зерен с облученной стороны. Последующий отжиг при температуре 700°С ( $\approx 0.3 \cdot T_{\text{плав}}$ ) ослаблял текстуру с облученной стороны, при этом не оказывая влияния на текстуру необлученной стороны.

Авторы благодарны Т.Ю. Киселевой и Центру коллективного пользования Кафедры Физики Твердого Тела Физфака МГУ за исследования отожженных фольг Мо и Та.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. V.A. Andrianov and et al.// Vacuum, 2021, V.193, P.110521.



ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ПОРОШКА ОКСИДА ЦИНКА МОДИФИЦИРОВАННОГО  
НАНОЧАСТИЦАМИ ОКСИДА МАГНИЯ

М.М. Михайлов<sup>1)</sup>, В.В. Нешименко<sup>1,2)</sup>, С.А. Юрьев<sup>1)</sup>, А.Н. Лапин<sup>1)</sup>, В.А. Горончко<sup>1)</sup> А.Н. Дудин<sup>2)</sup>, В.Ю.Юрина<sup>2,\*)</sup>

<sup>1)</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

<sup>2)</sup> Амурский государственный университет, Благовещенск, Россия  
\*) e-mail: viktoriay-09@mail.ru

В настоящей работе представлены результаты исследования спектров диффузного отражения, их изменений после облучения ускоренными электронами с энергией 30 кэВ и радиационной стойкости оптических свойств микропорошка ZnO, модифицированного наночастицами MgO различной концентрации. Установлено, что модифицирование наночастицами MgO при концентрации 3 масс.% приводит к увеличению радиационной стойкости в 1,32 раза.

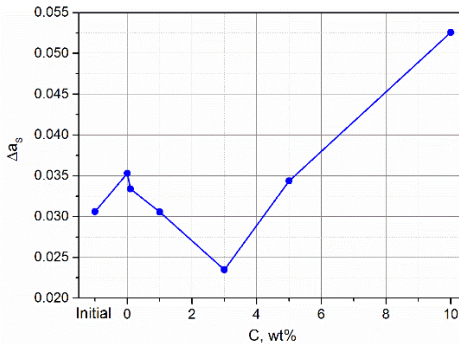


Рис.1 Зависимость изменений интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения исходного, прогретого и модифицированного порошка ZnO наночастицами MgO от 0.1 до 10 масс.% после облучения ускоренными электронами с энергией 30 кэВ флюенсом  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Госзадание), № 122082600014-6 (FZMU-2022-0007) и №FEWM-2023-0012.

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МИКРО- И НАНОПОРОШКОВ $Gd_2O_3$

М.М. Михайлов, В.А. Горончко<sup>\*)</sup>, Д.С. Федосов, А.Н. Лапин, С.А. Юрьев  
Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники (ТУСУР), Томск, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: W\_Goronchko@mail.ru

Для использования в терморегулирующих покрытиях космических аппаратов особый интерес в качестве пигментов или добавок к ним представляют микро- и нанопорошки оксидов редкоземельных элементов (РЗЭ), таких как  $Y_2O_3$ ,  $CeO_2$ ,  $Gd_2O_3$ . Микро- и нанопорошки  $Gd_2O_3$  обладают высоким отражением в области Солнечного излучения (См. Рис. 1).

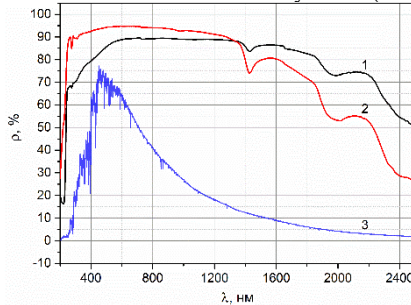


Рис.1 Спектры диффузного отражения микропорошка (1), нанопорошка (2)  $Gd_2O_3$  и спектр излучения Солнца (3)

В работе представлены результаты исследования оптических свойств и радиационной стойкости микро- и нано порошков  $Gd_2O_3$  после их облучения электронами ( $E=30$  кэВ,  $\Phi= (1 - 3) \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>). Порошки РЗЭ могут использоваться для повышения радиационной стойкости (РС) других пигментов за счет поглощения образованных в них при облучении свободных электронов при их переходах с d- на f- оболочку. Нанопорошки РЗЭ обладают дополнительным механизмом повышения РС – за счет релаксации на наночастицах первичных дефектов, образованных при облучении.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Госзадание), № FEWM-2023-0012.

РАДИАЦИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ КНС ПСЕВДО-МОП ТРАНЗИСТОРОВ  
ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ ИОНАМИ Хе и Вi

В.А. Антонов<sup>1)</sup>, А.П. Калугин<sup>1)</sup>, В.П. Попов<sup>1\*)</sup>,  
А.В. Мяконьких<sup>2)</sup>, К.В. Руденко<sup>2)</sup>, В.А. Скуратов<sup>3)</sup>  
<sup>1)</sup> ИФП СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск, Россия  
<sup>2)</sup> ФТИАН РАН им. К.А. Валиева, Москва, Россия  
<sup>3)</sup> ОИЯИ, Дубна, Россия  
<sup>\*)</sup> e-mail: popov@isp.nsc.ru

Электронное торможение быстрых тяжелых ионов (БТИ) в твердом теле и дальнейшая релаксация избыточной энергии возбужденной электронной и атомной подсистем приводят к образованию разупорядоченных областей вокруг ионных траекторий - латентных треков. Они существенно меняют свойства материала, а также его радиационную стойкость к другим видам облучения. В данной работе КНС псевдо-МОПТ структуры Si(500нм)/HfO<sub>2</sub>:Al(20нм)/сапфир(500 мкм) облучались быстрыми ионами Хе<sup>+26</sup> (150 МэВ) и Вi<sup>+51</sup> (670 МэВ) до флюенса  $2 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$ . Воздействие моноатомных частиц, таких как Хе или Вi приводит к формированию в кремнии латентных треков [1], не участвующих в проводимости, и снижению кондактанса КНС транзисторов более чем в 50 и 1000 раз для этих БТИ. В отличие от кремния, в кристаллах сапфира образуются латентные треки, сохраняющие кристаллическую структуру, диаметр которых составляет для БТИ Хе<sup>+26</sup> и Вi<sup>+51</sup> 1.7 и 3.4 нм, соответственно [2]. Как установлено, сдвиг порогового напряжения  $\Delta V_{th} = -1080$  В после БТИ из-за формирования наведенного положительного заряда  $Q = 1.3 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$  для Хе сравним с исходным зарядом  $Q_i$ , что свидетельствует об эффективной рекомбинации возбужденных БТИ электрон-дырочных пар на гетерогранице HfO<sub>2</sub>:Al/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Для Вi слой кремния при  $T = 300-500$  К полностью компенсирован и не проводит. Оценка введенного заряда, измеренного при 250°C, не превышает  $Q = 5 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$ .

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Комаров Ф.Ф. // УФН, 2017, **187**, 5, 465.
2. R.A. Rymzhanov et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017, **50**, 475301.

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ Н и Не НА АННИГИЛЯЦИЮ  
ПОЗИТРОНОВ В Zr и Nb

С.О. Огнев, Д.В. Терентьева, Л.А. Святкин, Р.С. Лаптев  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия

Многослойные наноразмерные покрытия (МНК) все чаще используются во многих отраслях промышленности. Системы из чередующихся слоев ГПУ/ОЦК металлов (в частности, Zr/Nb) обладают отличным потенциалом для создания радиационно-стойких композитов за счет наличия области стока для радиационных дефектов на некогерентных и полукогерентных границах раздела ГПУ/ОЦК слоев. Изучение из первых принципов характеристик электрон-позитронной аннигиляции позволяет получить фундаментальную информацию, необходимую для интерпретации экспериментальных исследований. В частности, необходимо понимание особенностей влияния примесей Н и Не на характеристики электрон-позитронной аннигиляции в решетках Zr и Nb. Целью данной работы является установление влияния примесных атомов Н и Не на параметры электрон-позитронной аннигиляции Zr и Nb.

Все расчеты проводились в рамках теории функционала электронной плотности методом проекционных присоединенных волн, реализованным в пакете программ AVINIT. Анализ результатов выявил повышение вероятности аннигиляции позитронов в области импульсов электронов, соответствующих энергиям от 5 до 8 кэВ для циркония и от 5 до 7 кэВ для ниобия для рассмотренных концентраций. Прослеживается большее влияние на импульсное распределение гелия, чем водорода. Добавление атомов водорода и гелия в ниобий и цирконий понижает вероятность аннигиляции позитронов на остовных электронах и увеличивает вероятность аннигиляции на валентных электронах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10343).

РЕНТГЕНОВСКИЙ ЗОНД С ИНТЕГРИРОВАННОЙ ОПТИКОЙ ДЛЯ  
ВОЗМОЖНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ В ТАРГЕТНОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ И  
БИОМЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Е.А. Созонтов

Национальный исследовательский центр  
“Курчатовский институт”, Москва, Россия  
e-mail: esozontov@yahoo.com

В настоящее время предпринимаются попытки заменить радиоизотопные источники, применяемые в медицине для брахитерапии, рентгеновскими источниками. Основное направление таких усилий заключается в разработке миниатюрных рентгеновских трубок, имплантируемых в опухоль непосредственно или около нее [1]. Мы развиваем альтернативный подход [2], основанный на использовании вторичного характеристического рентгеновского излучения, возбуждаемого первичным излучением от внешней рентгеновской трубки, оснащенной специальным рентгенооптическим коллиматором.

Обсуждается общая концепция и прототип экспериментальной лабораторной установки для облучения клеточных культур и лабораторных животных с высокой и низкой мощностью дозы для изучения действия малых и сублетальных доз. Получена детальная информация о пространственном распределении мощности дозы в облучаемом образце. Проведено сопоставление вычисленных значений поглощенной дозы рентгеновского излучения в исследуемом объекте с экспериментальными данными, подтвердившее работоспособность выбранной концепции.

ЛИТЕРАТУРА

1. M.J. Rivard, S.D. Davis, L.A. DeWerd. et al. // *Med. Phys.*, 2006, **33**, 4020.
2. S-W. Lee, E. Sozontov, E. Strumban, et al. // *J. Med. Phys.*, 2018, **43**, 247.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ ThO<sub>2</sub>  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PDF АНАЛИЗАТ.В. Плахова<sup>1\*</sup>, А.Ю. Романчук<sup>1</sup>, А.С. Кузенкова<sup>1</sup>,  
С.Н. Калмыков<sup>1</sup><sup>1</sup>) МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия<sup>\*</sup>) e-mail: plakhova.tv@radio.chem.msu.ru

Диоксид тория (ThO<sub>2</sub>) является перспективным материалом для применения в промышленности, а также для фундаментальных исследований диоксидов актинидов. На сегодняшний день механизмы формирования наночастиц ThO<sub>2</sub> в растворах являются предметом дискуссий. Th (IV) в растворе имеет склонность к образованию рентгеноаморфных осадков (ThO<sub>2</sub> (р/ам)). Ввиду отсутствия дальнего порядка в таких структурах их исследование является достаточно затруднительным.

PDF анализ полного рентгеновского рассеяния (HEXS/PDF) позволяет исследовать структуры без дальнего порядка, такие как дискретные кластеры в растворе или наночастицы. Ранее с помощью HEXS/PDF нами было показано, что образец ThO<sub>2</sub> (р/ам) синтезированный из 3М NaOH и 0,1 М раствора Th (IV) состоит из Th<sub>6</sub> кластеров в смеси с наночастицами ThO<sub>2</sub> размером <1,5 нм [1]. В рамках данной работы методом HEXS/PDF и порошковой дифракции были проанализированы образцы ThO<sub>2</sub> (р/ам), синтезированные из раствора соли Th (IV) (0,1 и 0,01М) при различных рН (рН 4 – 12). Было также исследовано влияние природы осадителя (NaOH или NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O) и температуры высушивания на состав Th-рентгеноаморфных осадков.

*Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2021-1353.*

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. L. Amidani et al // Chem. Eur. J., 2021, Vol. 27, № 1. P. 252–263.

## ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ХИРАЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ

С.Х.Сулейманов<sup>1</sup>, А.Ф.Зацепин<sup>2</sup>, Б.Л.Оксенгендлер<sup>1,2</sup>, С.Е.Максимов<sup>3</sup>,  
Н.Н.Никифорова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт материаловедения Академии Наук Республики Узбекистан,  
Ташкент, Узбекистан

<sup>1,2</sup>Физико-технологический институт Уральского федерального университета,  
Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им.У.А.Арифова  
АН Республики Узбекистан, Ташкент

Хиральность, являясь одной из важнейших структурных характеристик живых и неживых объектов, играет особо существенную роль именно в радиационно-физических процессах, которые, как представляется [1], ответственны за взаимные переходы живого и неживого состояния материи. Кроме этого, фундаментального обстоятельства, необходимо иметь в виду резко увеличивающееся число нанохиральных структур, и их значимость для современной техники и технологии (при неизменном участии радиации) [2]. В этой связи настоящей работе изучаются особенности механизмов радиационных атомных перестроек, где базовое значение имеют хиральные свойства облучаемых объектов. Нами выделены три типа элементарных атомных перестроек (радиационное дефектообразование, радиационно-стимулированная диффузия и радиационно-стимулированные квазихимические реакции, в которых изучается вопрос: как свойство хиральности проявляется при передаче энергии от радиации к веществу посредством пяти каналов (упругое рассеяние, ионизация, тепло, ударные и упругие волны). Полученная таким путём информация об элементарных актах использована для объяснения и предсказания особенностей ряда радиационных макроэффектов и определения их места в идеологии «complexity» [3].

## ЛИТЕРАТУРА

1. A. Doring, E. Ushakova, A.L. Rogach. //Light: Science & Applications. 2022. V.11. P.75.
2. Оксенгендлер Б.Л., Зацепин А.Ф. и др. //Поверхность. 2022. №6. С.53–63.
3. П.Бак. Как работает природа. Москва: УРСС,2013. 276 с.

## PREDICTING IRRADIATION INDUCED DAMAGE USING THE STOPPING AND RANGE OF IONS IN MATTER

Rofida Hamad Khelifa \*, Nicolay N. Nikitenkov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

\*rofida@tpu.ru

The Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) is a software package developed based on the binary collision approximation (BCA) method, which is a Monte Carlo approach designed to calculate deposition profiles in materials exposed to energetic ion beams. SRIM is used frequently in the calculations of electronic and nuclear stopping powers for energetic incident ion in target atoms as it moves through the target until coming into rest. The resulting displacement or vacancies production is usually used to estimate the local damage dose in displacement per atoms (dpa), and to assess the irradiation effects caused by energetic charged particles in terms of structure and modifications of target composition and surface topography. SRIM offers two approaches to estimate ion induced damage in a target. The quick calculation of damage (K-P) mode which represents a quick statistical estimate based on the Kinchin-Pease "K-P" formalism, and it follows only the path of incidence ions; and the full-cascade detailed damage calculation option. While ion irradiation represents an essential substitute for the high dose neutron irradiation, there has been though some discussions and concerns regarding some observed discrepancies in the number of atomic displacements per ion produced by the two different calculation options provided by SRIM. In this study, different ions with different energies were used to calculate the displacement damage in targets using SRIM provide different damage calculation options, to study and quantify the discrepancies that would arise in each case; this will contribute in the assessment and the better understanding of such discrepancies.



ОСОБЕННОСТИ ИНДУЦИРОВАННОГО МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ  
ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В СПЛАВЕ FeRh

А.С. Комлев<sup>\*)</sup>, Р.А. Макарьин, А.Р. Ващенко, М.С. Селезнев,  
Н.С. Перов

<sup>1)</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

<sup>\*)</sup> e-mail: alkomlev98@yandex.ru

Изучение магнитных материалов и их свойств уже многие десятилетия вызывает большой интерес. Магнитные материалы, благодаря своим уникальным магнитным свойствам, имеют широкий спектр технологических применений в различных областях. Сплав FeRh является одним из материалов, который привлек значительное внимание научного сообщества из-за его особых магнитных свойств и потенциальных применений в устройствах магнитной памяти [1].

FeRh сплав демонстрирует магнитный фазовый переход первого рода из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние при нагревании. Этот переход также может индуцироваться внешним магнитным полем. Критическая температура, при которой он происходит, зависит от напряженности поля [2]. В докладе мы демонстрируем экспериментальные данные, полученные при помощи магнитометрии и измерения магнитосопротивления, которые свидетельствуют о различных механизмах роста ферромагнитной фазы при температурном и полевым воздействии.

Понимание этого перехода имеет решающее значение как для фундаментальных исследований, так и для технологических приложений. Для дальнейшего уточнения механизмов природы фазового перехода требуются дополнительные нейтронографические или синхротронные исследования

Авторы выражают благодарность за поддержку гранта Минобрнауки России № 075-15-2021-1353.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Huang P.-W., // IEEE Transactions on Magnetics. 2014. Vol. 50, № 11. P. 1–4.
2. Komlev A.S. et al. // Journal of Alloys and Compounds. 2021. Vol. 874. P. 159924

## ИМПЕДАНСНО-РЕЗОНАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ В ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ ЛАЗЕРАХ

Чиркин М.В.<sup>1</sup>, Устинов С.В.<sup>1\*</sup>, Мишин В.Ю.<sup>1</sup>, Серебряков А.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Рязанский Государственный Радиотехнический Университет имени В.Ф. Уткина, г. Рязань, Россия.

\*)ustinow62@yandex.ru

Цель работы. Обеспечить устойчивую работу кольцевого лазерного гироскопа в области малых токов разряда ( $I/r < 10$  мА/см,  $I$  – ток в плече) в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды. Исследование зависимостей критической величины тока разряда от температуры газовой смеси, давления газового наполнения и содержания в нем легко ионизируемых примесей невозможно без модели модулированного положительного столба, адекватно описывающей особенности ионизационного баланса в кольцевых гелий-неоновых лазерах. Известно, что возмущения в положительном столбе в узком разрядном канале, окруженном металлическим экраном, распространяются как в активной линии передачи. Поэтому проблема анализа устойчивости электрической цепи разряда в кольцевом лазере включает также задачу учета токов смещения, текущих через оптическую стеклокерамику между разрядным каналом и корпусом прибора. (см. Рис. 1) [1].

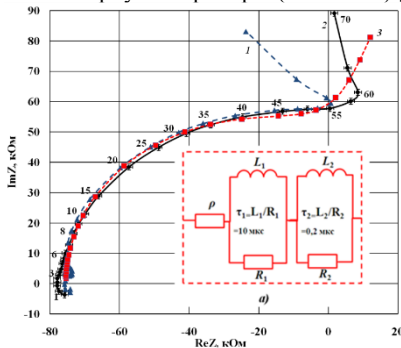


Рис. 1. Годографы частотных зависимостей комплексного сопротивления положительного столба: 1 – обработка результатов измерений без учета поправки, 2 поправка учтена, 3 – схема замещения, представленная на рис. 1,а. Постоянная составляющая тока разряда – 0,75 мА, температура моноблока – -27°C. Около экспериментальных точек указаны частоты модуляции в кГц.

Разработана математическая модель на основе системы уравнений баланса заряженных частиц и метастабильных атомов неона и гелия в плазме при слабом гармоническом возмущении газового разряда, которая учитывает влияние тока, радиуса разрядного канала, температуры, состава и давления газовой смеси, частоты реакции Пеннинга и позволяет рассчитать частотную зависимость удельных значений комплексного сопротивления положительного столба цилиндрического канала. Обнаружен рост отрицательной активной составляющей комплексного сопротивления плазмы для частот, превышающих 50 кГц, в результате увеличения температуры газовой смеси и идентифицирован механизм снижения устойчивости разряда постоянного тока в кольцевом гелий-неоновом лазере, в том числе вблизи верхней границы температурного диапазона.

1. Молчанов А.В., Морозов Д.А., Устинов С.В., Чиркин М.В. Модуляционные исследования газоразрядной плазмы в гелий-неоновом лазере // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2015. – № 54. Ч.2 – С. 115-120.

