

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ  
ФИЗИКИ имени Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА**

***ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ***

***XLVIII международной Тулиновской конферен-  
ции***

***ПО ФИЗИКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С КРИСТАЛЛАМИ***

(Москва 29 мая – 31 мая 2018)



Москва 2018

УДК 539.1.01.08

ББК 22.37.

T29

Под общей редакцией проф. М.И. Панасюка

Редколлегия: А.М. Борисов, Ю.А. Ермаков, А.С. Кубанкин, В.С. Куликаускас, Е.С. Машкова, В.С. Черныш, Н.Г. Чеченин

T29 Тезисы докладов XLVIII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Под ред. проф. М.И. Панасюка. – М.: Университетская книга, 2018. –с. 186.

Сборник содержит тезисы докладов, отобранные оргкомитетом для представления на конференции.

ПРОГРАММА 48-й МЕЖДУНАРОДНОЙ ТУЛИНОВСКОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ ПО ФИЗИКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С КРИСТАЛЛАМИ.

1-й день, вторник 29 мая

8<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> -11 <sup>00</sup> <u>М.И. Панасюк</u> . Тяжелые ионы в космосе: био- и технологическая опасность .....	3
11 <sup>00</sup> -11 <sup>30</sup> <u>П.А. Карасев, А.И. Титов, К.В.Карабешкин, А.Ю.Азаров</u> . Влияние плотности каскадов смещений на радиационные повреждения широкозонных полупроводников.....	5
11 <sup>30</sup> -12 <sup>00</sup> <u>В.И. Алексеев, А.Н. Елисеев, Э.Ф. Иррибарра, И.А. Кишин, А.С. Кубанкин, Р.М. Нажмудинов</u> . Параметрическое рентгеновское излучение релятивистских электронов из вольфрамового порошка с микронным размером зерен.....	6

12<sup>00</sup> - 12<sup>15</sup> общее фото

12<sup>15</sup> - 13<sup>15</sup> Перерыв на чай и кофе

**Секция II**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТЬЮ И  
НАНОСТРУКТУРАМИ (РАСПЫЛЕНИЕ, ВКЛЮЧАЯ  
РАСПЫЛЕНИЕ КЛАСТЕРАМИ, ФОРМИРОВАНИЕ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ НАНОСТРУКТУР И ИХ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ, ЭМИССИЯ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ)**

**1-е заседание, 13<sup>15</sup>-14<sup>15</sup>**

**Председатель В.С. Черныш**

13 <sup>15</sup> -13 <sup>30</sup> <b><u>Н.В. Максютя, В.И. Высоцкий, С.В. Ефименко, Е.В. Мартыш, Д.Н. Максютя, А.С. Сабинов</u></b> О влиянии некогерентных процессов на каналирование атомов водорода в нехиральных углеродных нанотрубках .....	9
13 <sup>30</sup> -13 <sup>45</sup> <b><u>В.В. Углов, Г. Абади, С.В. Злоцкий, И.А. Солодунин, А.Д. Подобед.</u></b> Блистерообразование в нанокompозитных пленках ZrSiN, облученных ионами гелия.....	10
13 <sup>45</sup> -13 <sup>00</sup> <b><u>В.А. Аникин, А.М. Борисов, А.В. Макунин, Е.С. Машкова, М.А. Овчинников.</u></b> Влияние распыления на ионно-индуцированное гофрирование поверхности углеродного волокна ....	11
14 <sup>00</sup> -14 <sup>15</sup> <b><u>В.С. Ковичак.</u></b> Формирование углеродного наноматериала на поверхности различных органических полимеров при воздействии мощного ионного пучка.....	12

*14<sup>15</sup> – 15<sup>15</sup> перерыв на обед*

**2-е заседание, 15<sup>15</sup> -16<sup>30</sup>**

**Председатель А.М. Борисов**

15 <sup>15</sup> -15 <sup>30</sup> <b><u>А.И. Титов, П.А. Карасев, А.И. Стручков, A. Kumar, R. Singh, D. Kanjilal.</u></b> Деградация проводимости GaN при облучении быстрыми тяжелыми ионами .....	13
15 <sup>30</sup> – 15 <sup>45</sup> <b><u>В.О. Пеленович</u></b> Разработка кластерного источника и его применение для сглаживания и чистки поверхности .....	14
15 <sup>45</sup> – 16 <sup>00</sup> <b><u>Д.С. Киреев</u></b> Эволюция наноструктур при облучении кластерными ионами .....	15
16 <sup>00</sup> – 16 <sup>15</sup> <b><u>П.Ю. Бабенко</u></b> Получение потенциалов взаимодействия атом-поверхность из экспериментальных данных о рассеянии .....	16
16 <sup>15</sup> – 16 <sup>30</sup> <b><u>В.В. Нешименко</u></b> Особенности деградации оптических свойств полых частиц TiO <sub>2</sub> , ZnO, SiO <sub>2</sub> при воздействии ионизирующих излучений .....	17

**16<sup>30</sup> -18 обсуждение стендовых докладов**

**Ужин**

Стеновые доклады

1.	<b>В.Н.Самойлов.</b> Об эффекте кристаллической структуры в распылении двухкомпонентных монокристаллических мишеней...	18
2.	<b>Мусин А. И.</b> О некоторых особенностях фокусировки распыленных атомов при эмиссии с поверхности грани (001) Ni .....	19
3.	<b>Сычева А. А.</b> Исследование структурных изменений нанопористых Si-содержащих материалов в процессе их физического распыления ионами Ag низких энергий.....	20
4.	<b>Сычева А. А.</b> Анализ результатов моделирования распыления кремния в зависимости от различных Ar-Si потенциалов.....	21
5.	<b>Рыбакова А.В.</b> Дифференциальные сечения неупругого рассеяния электронов в вольфраме	22
6.	<b>Андрианова Н. Н.</b> Формирование нанокристаллического графита на поверхности углеродных материалов при высокодозном ионном облучении	23
7.	<b>Шульга В.И.</b> Расчет коэффициента распыления аморфного кремния при бомбардировке ионами азота и аргона	24
8.	<b>Корнич Г.В.</b> Модификация потенциалов межатомного взаимодействия при моделировании трехмерных атомных систем методами ускоренной молекулярной динамики .....	25
9.	<b>Сошников И. П.</b> Формирование и пассивация наноразмерных мезаструктур с квантовыми точками InGaN/GaN	26
10.	<b>С. Б. Донаев</b> Электронная спектроскопия поверхности тонких пленок GaAlAs/GaAs	27
11.	<b>Б. Е. Умирзаков</b> Электронная структура пленок GaAs И Ga <sub>0,5</sub> Al <sub>0,5</sub> As .....	28
12.	<b>Широкопад Д. В.</b> Формирование оболочечных структур из биметаллических янусоподобных нанокластеров под действием ионной бомбардировки	29
13.	<b>Бакаева А. М.</b> Влияние облучения тяжелыми ионами на микроструктуру и поверхностное упрочнение вольфрама .....	30
14.	<b>Крестя В. И.</b> Расчет зависимости эффективного коэффициента электронной эмиссии Катоды с тонкой диэлектрической пленкой от ее толщины и температуры в слаботочном газовом разряде.....	31
15.	<b>Крестя В. И.</b> Моделирование влияния температуры на энергетические спектры ионов и атомов и коэффициент распыления катода .....	32
16.	<b>У.Б.Шаропов</b> Стимулированное распыление дефектообразованием в кристаллах SiO <sub>2</sub> .....	33
17.	<b>Р.Джаббарганов</b> Энергетический порог атомарного и кластерного распыления некоторых элементов при бомбардировке ионами Cs, Rb, Na	34
18.	<b>Бакаев А. В.</b> Удержание кластеров водорода и гелия в ядре краевой и винтовой дислокации в вольфраме, облученном плазмой	35

#### IV

19.	<b>Умаров Ф. Ф.</b> Влияние соотношения масс частиц на особенности приповерхностной ионной имплантации в условиях каналирования.....	36
20.	<b>Толмачев А.И.</b> Расчет коэффициента распыления при бомбардировке твердого тела ионами: компьютерное моделирование и теория	37
21.	<b>Толмачев А.И.</b> Программа компьютерного моделирования отражения ионов от твердых тел	38
22.	<b>Андреев В.В.</b> Влияние сильнополевой инжекции электронов на зарядовые явления в диэлектрических пленках МДП-структур при воздействии радиационных излучений	39
23.	<b>Машкова Е.С.</b> Динамический отжиг ионно-индуцированных радиационных нарушений при повышенной температуре облучаемого алмаза	40
24.	<b>Борисов А.М.</b> Ионно-лучевое модифицирование наноглобулярной структуры стеклоглелерода	41
25.	<b>Гладышев Ю. А.</b> О моделировании процесса остывания многослойной планарной полупроводниковой мишени, облучённой широким электронным пучком	42
26.	<b>Серегина Е. В.</b> О модификации модели диффузии неосновных носителей заряда, генерированных в многослойной планарной полупроводниковой структуре широким электронным пучком, основанной на использовании рекурсивных тригонометрических функций	43
27.	<b>Амрастанов А. Н.</b> Оценка нагрева поверхности однородной металлической мишени низкоэнергетичным электронным зондом	44
28.	<b>Эргашов Ё. С.</b> Особенности формирования трехкомпонентных слоев CdTe ионами Ва <sub>+</sub>	45
29.	<b>Ахунов Ш. Д.</b> Исследование примесьюсодержащего кремния при бомбардировке тяжелыми кластерными ионами Au <sub>m</sub>	46
30.	<b>Рахманов Г. Т.</b> Определение кинетических характеристик термодесорбции и гетерогенной реакции диссоциации молекул морфина и тебаина на поверхности окисленного вольфрама.	47
31.	<b>В.С. Малышевский</b> Динамический потенциал взаимодействия атомов азота с поверхностью кристалла алюминия	48
32.	<b>Д.К. Миннебаев</b> Модификация графена ионным облучением	49
33.	<b>А.В. Назаров.</b> Моделирование угловых распределений атомов, распылённых пучком газовых кластерных ионов	50
34.	<b>С.И. Кузнецов</b> Генерация жесткого тормозного излучения при скользящем взаимодействии пучка бетатрона с поверхностью Та фольги	51
35.	<b>С.Е. Максимов</b> Эмиссия и фрагментация кластеров SinOm- под действием ионной бомбардировки.	52
36.	<b>Е.Н. Моос.</b> Эволюция поверхности катодов в газовом разряде.	53
37.	<b>Д.А. Ташмухамедова</b> Электронные и оптические свойства нанопленок NiSi <sub>2</sub> /Si.	54
38.	<b>А.Н. Пустовит.</b> Причины невоспроизводимости результатов измерений на начальной стадии распыления.	55
39.	<b>В.Н. Арустамов.</b> Синтез вещества при вакуумно- дуговой конден-	

	сации в условиях ионной бомбардировки.	56
40.	<b>В.Н. Арустамов.</b> Характер воздействия катодной плазмы вакуумной дуги на металлическую поверхность.	57
41.	<b>А.В. Степанов.</b> Моделирование формирования дефектов при ионном облучении нанотрубок.	58
42.	<b>А.С. Грязев.</b> Исследование процессов восстановления графена из оксида графена методами электронной спектроскопии.	59
43.	<b>Е.М. Elsehly.</b> Enhancement of cnt-based filters by He ion irradiation.	60
44.	<b>С.В. Константинов.</b> Эффекты блистеринга наноструктурированных покрытий при облучении ионами гелия.	61
45.	<b>П. Мажаров.</b> Наноструктурирование фокусированным ионным пучком	62

2-й день, 30 мая

Секция III

**ФИЗИКА ПРОХОЖДЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО (МНОГОКРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ,  
ОРИЕНТАЦИОННЫЕ И РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭФФЕКТЫ,  
ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, ИЗМЕНЕНИЕ ЗАРЯДОВОГО  
СОСТОЯНИЯ ЧАСТИЦ, ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И  
ПОЗИТРОНОВ И Т.П., ГЕНЕРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ)**

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

Председатель Н.В. Новиков

10 <sup>00</sup> -10 <sup>15</sup> А.В. Лубенченко. Вычитание фона РФЭС с учетом многократного неупругого рассеяния фотоэлектронов в объеме и на поверхности твердого тела .....	65
10 <sup>15</sup> -10 <sup>30</sup> Е.А. Мазур. Non-dipole features in the photon emission spectrum of the fast-oriented lepton in the crystal.....	66
10 <sup>30</sup> -10 <sup>45</sup> Н.П. Калашников. «Тонкое» расщепление энергетических уровней в результате спин-орбитального взаимодействия каналированных электронов.....	67
10 <sup>45</sup> -11 <sup>00</sup> Н.В. Новиков. Особенности зарядово-энергетического распределения быстрых многозарядных ионов.....	68
11 <sup>00</sup> -11 <sup>15</sup> Н.Н. Михеев. Двухпотоковая модель транспорта заряженных частиц в конденсированном веществе при многократном рассеянии: средние потери энергии и пробег пучка моноэнергетических электронов с энергией 0.1 кэВ – 1.0 МэВ.....	69

11<sup>15</sup> -11<sup>30</sup> перерыв на чай, кофе

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

Председатель А.С. Кубанкин

11 <sup>30</sup> -11 <sup>45</sup> Р.М. Нажмудинов. Ионизационные потери энергии протонов с энергией 50 ГэВ в слое кремния толщиной от 157 мкм до 10 мм.	70
11 <sup>45</sup> -12 <sup>00</sup> С.Ю. Гоголев. Когерентное излучение Вавилова-Черенкова от мишеней с заданными диэлектрическими свойствами.	71
12 <sup>00</sup> -12 <sup>15</sup> И.Е. Внуков. Измерение поперечных размеров пучка электронов по угловому распределению их когерентного излучения в кристалле.	72

## VII

12 <sup>15</sup> -12 <sup>30</sup> <b>В. К. Егоров</b> Модель уменьшения угловой расходимости потока, формируемого составным рентгеновским волновым-резонатором	73
---	----

### 12<sup>45</sup>-14<sup>00</sup>, 3-е заседание

12 <sup>45</sup> -13 <sup>00</sup> <b>А.В. Шагин</b> Пироэлектрический ондулятор	74
13 <sup>00</sup> -13 <sup>15</sup> <b>С.В.Трофименко.</b> Интерференционные эффекты в параметрическом рентгеновском и дифрагированном переходном излучении электрона в ультратонком кристалле.....	75
13 <sup>15</sup> -13 <sup>30</sup> <b>О.О. Иващук.</b> Ускорение электронов и генерация рентгеновского излучения при сжатии пьезоэлектрика в вакууме.....	76
13 <sup>45</sup> -14 <sup>00</sup> <b>К.Е. Марковец.</b> Зарядка и переключения вектора спонтанной поляризации сегнетоэлектриков при электронном облучении.....	77

### 14<sup>00</sup> – 15<sup>00</sup> Перерыв на обед

### 17<sup>15</sup>-18<sup>45</sup> Обсуждение стендовых докладов

### Стендовые доклады

1. <b>А.В. Шагин.</b> Эффект исчезновения спектрального пика Ландау	78
2. <b>А. С. Русецкий</b> Излучение рентгеновских квантов, нейтронов и заряженных частиц при рентгеновском облучении дейтерированных кристаллических структур	79
3. <b>А. А. Кизириди</b> Способ измерения размеров ультракоротких пучков заряженных частиц	80
4. <b>Е. А. Мазур</b> Generation of plasmons by fast oriented electron and positron and the volume capture in the bent crystal	81
5. <b>С.В. Трофименко.</b> Производство заряженных частиц в вольфрамовой мишени электронами с энергией 7 ГэВ	82
6. <b>З. А. Шарипов</b> Молекулярно-динамическое моделирование эффектов дальнего действия в металлах при облучении нанокластерами	83
7. <b>М. А. Сиднин</b> Влияние условий измерений на когерентное излучение электронов в брэгговском направлении	84
8. <b>И. Е. Внуков</b> Об использовании дифрагированного дифракционного излучения электронов в рентгеновских зеркалах для оценки параметров электронных пучков	85
9. <b>Г. М. Филиппов</b> Исследование резонансных явлений в процессе перфорирования тонкой пленки при прохождении многозарядных ионов	86
10. <b>Г. М. Филиппов</b> Прохождение волн и частиц через упорядоченные структуры	87

## VIII

11. **Д. Р. Бадреева** Комбинационное рассеяние фотонов на электронах, движущихся в режиме осевого каналирования 88
12. **Т.А. Тухфатуллин.** Влияние эффекта каналирования на усиление реакции  $d(3hE, P)4hE$  в астрофизической области энергий 89
13. **О.О. Ивашук** Рентгеновское излучение при нагреве и охлаждении двух пьезоэлектрических кристаллов, установленных в вакууме 90
14. **Тан Цичэн.** Влияние водорода на электрическое сопротивление циркония: расчеты из первых принципов 91
15. **Л. А. Святкин** Диффузионные барьеры для атома водорода в альфа-титане: расчеты из первых принципов 92
16. **С. А. Строков** Моделирование динамической температурной деформации кристаллической мишени под воздействием субпикосекундного электронного пучка 93
17. **Ю.А.Белкова** Особенности потери энергии тяжелых ионов в углероде в зависимости от скорости 94
18. **Н. В. Максютя** Излучение электронов при плоскостном каналировании в кристаллах со структурой цезий хлор 95
19. **В. П. Кощев** Потенциальная энергия взаимодействия атома с атомной плоскостью 96
20. **В. П. Кощев** Моделирование отклонения электронов изогнутым кристаллом кремния и германия 97
21. **М. А. Степович** Особенности полевой эмиссии электронов при изменении позиционного порядка в коллоидных растворах и жидких кристаллах 98
22. **Д. С. Мелузова** Влияние поляризационного потенциала на отражение частиц от поверхности кристалла 99
23. **А. Н. Зиновьев** Моделирование рассеяния частиц на аморфных и поликристаллических мишенях 100
24. **А.В. Щагин.** Эквивалентность ионизационных потерь электронов и позитронов с энергией 7 ГэВ. 101
25. **А.В. Щагин.** Пьезоэлектрический трансформатора в вакууме для производства рентгеновского излучения 102
26. **О.О. Ивашук.** Пьезоэлектрический дефлектор пучка электронов с энергией 7 МэВ 103
27. **Вохмянина К. А.** Прохождение электронов с энергией 10 КэВ через керамические макроканалы 104
28. **Анрианов В. А.** Особенности работы пьезоэлектрических кристаллов в источниках рентгеновского и нейтронного излучения 105
29. **Ю.Л. Пивоваров** Sub-GeV electrons scattering by ultrathin crystals. 106
30. **Ю. Л. Пивоваров** Каналирование релятивистских тяжелых ионов в полуволновом кристалле 107
31. **В. В. Сыщенко** Структура фазового пространства каналированных электронов и позитронов в кристалле кремния 108

## IX

32. **В. В. Сыщенко** Поляризация дифракционного излучения на проводящей сфере и полсферическом выступе в проводящей плоскости 109
33. **А.А. Корнилова** Исследование характеристик удаленных незатухающих температурных волн 110
34. **В.И. Высоцкий** Особенности распространения, эволюция и коллапс коррелированного пакета 111
35. **В.И. Высоцкий** Механизм аномально ядерного синтеза при ориентационном движении медленных протонов в кристалле лития. 112
36. **Ш. Д. Ахунов** Исследование процесса ионообразования электроспрейной ионизации при высоком вакууме 113
37. **И. П. Чернов** Воздействие слабого электромагнитного поля на систему металл-водород 114
38. **А.В. Степанов** Гиперзвуковые модели эффекта дальнего действия в твердотельных и гибридных (жидкостно-твердотельных) системах при ионом и световом воздействии 115
39. **К.М. Мукашев** Нанокластерные образования в структуре металлов по данным позитронной спектроскопии 116
40. **Ю.В. Балакшин** Влияние зарядового состояния ионов ксенона на проникновение и дефектообразование при имплантации в кремний 117
41. **С. В. Блажевич** Когерентное рентгеновское излучение вблизи оси пучка релятивистских электронов в геометрии рассеяния Брэгга 118
42. **С. В. Блажевич** Когерентное рентгеновское излучение пучка релятивистских электронов, пересекающих составную мишень «аморфный слой-вакуум-монокристаллических слой» 119

**Секция 4**

**Модификация и анализ приповерхностных слоев ионными и электронными пучками** (ионная имплантация и радиационно-индуцированные эффекты, диагностика).

**15<sup>00</sup>-16<sup>00</sup>, 1-е заседание****Председатель Ташлыкова-Бушкевич И.И.**

15 <sup>00</sup> -15 <sup>15</sup> <b>Е.А. Воробьева.</b> Изменение смачиваемости поверхности углеродных нанотрубок с помощью ионного облучения....	123
15 <sup>15</sup> -15 <sup>30</sup> <b>Н.В. Волков.</b> Формирование топографии поверхности монокристаллических образцов кремния под облучением пучками ионов гелия и аргона со средней энергией 10 кэВ.....	124
15 <sup>30</sup> -15 <sup>45</sup> <b>М.А. Моховиков.</b> Трековая модификация нанокompозита SiO <sub>2</sub> : Zn/Si при облучении быстрыми ионами Хе.....	125
15 <sup>45</sup> -16 <sup>00</sup> <b>Н.С. Нечаев.</b> Облучение быстрыми ионами Хе кремния и диоксида кремния с нанокластерами InAs.....	126

**16<sup>00</sup> - 16<sup>15</sup> перерыв на чай, кофе****16<sup>15</sup> - 17<sup>15</sup>, 2-е заседание****Председатель В.В. Козловский**

16 <sup>15</sup> -16 <sup>30</sup> <b>И.А. Бушкевич.</b> Применение метода POP для исследования быстрозатвердевшего алюминиево-литиевого сплава.....	127
16 <sup>30</sup> -16 <sup>45</sup> <b>И.И. Ташлыкова-Бушкевич.</b> Модификация структуры поверхности сплавов Al-Fe высоко- и гиперскоростной кристаллизацией.....	128
16 <sup>45</sup> -17 <sup>00</sup> <b>В.И. Бачурин.</b> Послойный анализ тонкопленочных Si-O-Al структур методами вторично-ионной масс-спектрометрии и резерфордского обратного рассеяния.....	129
17 <sup>00</sup> -17 <sup>15</sup> <b>А. В. Кожемяко</b> Модификация свойств наноразмерного кремния с помощью ионных пучков.....	130

*Экскурсия по лабораториям ОФАЯ НИИЯФ или МГУ . 18<sup>45</sup>*

31 мая, четверг, 10<sup>00</sup> - 11<sup>30</sup>

Секция 4, 3-е заседание

Председатель В.В. Привезенцев

10 <sup>00</sup> -10 <sup>15</sup> Д.С. Королев. Температурная зависимость дислокационной фотолюминесценции в ионно-имплантированном кремнии, дополнительно легированном акцепторными примесями.....	131
10 <sup>15</sup> -10 <sup>30</sup> В.В. Козловский. Образование радиационных дефектов в карбиде кремния при торможении протонов.....	132
10 <sup>30</sup> -10 <sup>45</sup> В.В. Привезенцев. Ионно-трековая модификация пленки диоксида кремния, имплантированной цинком и отожженной в кислороде.....	133
10 <sup>45</sup> -11 <sup>05</sup> А.Ф. Гурбич. Новый ускоритель ГНЦ РФ – ФЭИ.....	134
11 <sup>05</sup> -11 <sup>30</sup> G. Geurkov. Ortec's specialty and customized hpge solutions for research field.....	135

*11<sup>30</sup>-11<sup>45</sup> перерыв на чай, кофе*

11<sup>45</sup> – 13<sup>00</sup> Обсуждение стендовых докладов

Стендовые доклады

1.	<b>Каменских А.И.</b> Исследование плазменных покрытий с верхним слоем оксида гафния с помощью спектрометрии ядерного обратного рассеяния	136
2.	<b>Субботин Н.Ю.</b> Определение концентрации дейтерия, имплантированного в бериллий, методом электронного RBS	137
3.	<b>Стельмах В. Г.</b> О минимальной энергии, необходимой атому водорода для проникновения внутрь фуллерена	138
4.	<b>Волков Н. В.</b> Эффективность ионного перемешивания в молибденовой подложке под облучением пучком ионов He+ и Ar+ со средней энергией 10 и 20 кэВ	139
5.	<b>Рысбаев А. С.</b> Об образовании пленок силицидов металлов (Li, Na, K, Cs, Rb, Ba) при ионной имплантации в sI и последующем термическом отжиге	140
6.	<b>Камилов Т. С.</b> Влияние структурных дефектов в sI на формирование фоточувствительных свойств в гетероструктурах Mn4Si7-Si<Mn>-Mn4Si7 и Mn4Si7-Si<Mn>-M	141
7.	<b>Волков Н. В.</b> Анализ состояния поверхностных слоев ионно-облученных монокристаллов кремния методами инфракрасной спектроскопии	142

ХП

8.	<b>Вершинин Г. А.</b> Моделирование на основе программы TRIM профилей распределения атомов при двухпучковой ионной имплантации в многокомпонентные мишени	143
9.	<b>Раббимов Э.</b> пороговые особенности коэффициента упругоотраженных электронов MgO имплантированных ионами Ва	144
10.	<b>Б.Е. Умирзаков</b> влияние бомбардировки ионов Ag <sup>+</sup> на состав, структуру и свойства пленок SiO <sub>2</sub> /Si	145
11.	<b>Юсупжонova М.Б.</b> Получение и изучение электронных свойств тонких пленок SiO <sub>2</sub> /Si	146
12.	<b>Абдувайитов А.А.</b> Исследование состава неконтролируемых примесей на границе раздела полупроводник – металл ЭОС и ВИМС	147
13.	<b>Ковивчак В. С.</b> Разрушение поверхностных слоев алюмооксидной керамики при воздействии мощного ионного пучка наносекундной длительности	148
14.	<b>Б.Е.Умирзаков</b> Изменение состава и свойства свободных пленок Si-Cu при бомбардировке ионами Ва <sup>+</sup>	149
15.	<b>Завидовский И. А.</b> Влияние ионной стимуляции на изменение удельного электросопротивления тонких углеродных пленок, получаемых методом импульсно-плазменного распыления графита	150
16.	<b>Б.Е.Умирзаков</b> Влияние имплантации ионов O <sub>2</sub> <sup>+</sup> на состав и электрические свойства слоистых структур Si-Cu	151
17.	<b>Панова Т. В.</b> Формирование оксидных слоев на поверхности медных сплавов, модифицированных мощным ионным пучком	152
18.	<b>Умирзаков Б.Е.</b> Состав и морфология поверхности CaF <sub>2</sub> с наноразмерными фазами Si	153
19.	<b>Поплавский В.В.</b> Composition of catalytic layers prepared by ion beam assisted deposition of platinum and gadolinium on carbon substrates	154
20.	<b>Никольская А. А.</b> Свойства гексагонального кремния, синтезируемого с помощью ионной имплантации	155
21.	<b>Эргашов Ё. С.</b> Влияние высокотемпературного прогрева на состав и электронного структуру тонких пленок Cd <sub>0,5</sub> Ba <sub>0,5</sub> /CdTe	156
22.	<b>Кудюкин А. И.</b> Эрозия поверхности электродов плазмой разряда	157
23.	<b>Каменских А.И</b> Исследование диффузии азота и бора в сталях методом ядерного обратного рассеяния	158
24.	<b>Е.Ю.Зыкова</b> Электронно-индуцированная зарядка монокристаллов сапфира и кварца после их облучения ионами и протонами	159

### XIII

25.	<b>Е.В. Окулич</b> Моделирование кинетики накопления точечных дефектов при ионном облучении кремния с учетом пространственно-временной стохастичности генерации и эволюции дефектов	160
26.	<b>Е. Н. Моос</b> Делокализация процессов электрической эрозии поверхностными наноструктурами	161
27.	<b>К. В. Крайнов</b> Распыление мишени и образование пленок при облучении ионами $C_{60}$	162
28.	<b>М. С. Тужилкин</b> Формирование наночастиц золота на кремнии при облучении ионами	163
29.	<b>О.А. Подсвиров</b> Модификация приповерхностных слоев серебросодержащих фосфатных стекол электронным облучением	164
30.	<b>У.Б.Шаропов</b> Образование вакансий на поверхности кристаллов оксида цинка	165
31.	<b>А.В. Дубинко</b> Исследование микроструктуры вольфрама, индуцированной под воздействием пластической деформации, комбинированными экспериментальными методами.	166
32.	<b>Кабышев А. В.</b> Влияние ионного облучения на оптические свойства пленок нитридов алюминия и кремния	167
33.	<b>Питиримова Е. А.</b> Ионно-имплантационное управление концентрацией дырок в слоях GaSb	168
34.	<b>А.А. Шемухин</b> Матрицы для транспортировки пучков высоких энергий	169
35.	<b>З.М. Хамдохов</b> Формирование автоэмиссионных катодов на основе углеродных материалов, полученных ионно-плазменным методом	170
36.	<b>Кузнецов С.И.</b> Анализ природных алмазов методом резерфордовского обратного рассеяния	171
37.	<b>Максимов С.Е.</b> Деградация перовскитных солнечных ячеек под действием заряженных частиц	172
38.	<b>В.Н. Арустамов</b> Моделирование процессов в катодном пятне вакуумной дуги.	173
39.	<b>В.Н. Арустамов</b> Формирование плазменного вакуумного дугового воздействия на внутреннюю поверхность труб	174
40.	<b>В.Н. Арустамов</b> Вакуумно дуговое осаждение покрытий в условиях иммерсионного ионного воздействия на поверхность	175

## XIV

41.	<b>Бабихина М. Н.</b> In situ исследования фазовых переходов в сплаве Ti-6Al-4V, полученном методом электронно-лучевого сплавления	176
42.	<b>Куренных Т.Е.</b> Применение методики ядерных реакций для исследования диффузии дейтерия в щелочных металлах	177



**Секция I**

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



## ТЯЖЕЛЫЕ ЯДРА – НОВАЯ КОМПОНЕНТА РАДИАЦИОННОГО РИСКА В КОСМОСЕ

М.И. Панасюк

НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова

Потоки тяжелых заряженных энергичных частиц (HZE-particles) - ядер или ионов в космическом пространстве, как правило, малы по сравнению с протонными и электронными и не могут вызвать заметных дозовых эффектов. Однако именно они рассматриваются как основной компонент, вызывающий так называемые одиночные сбои (Single Events Effects) в микроэлектронике и локальные нарушения в биологических структурах на молекулярном уровне. Их роль среди других эффектов радиационного воздействия чрезвычайно актуальна как с точки зрения надежности космических аппаратов, так и снижения риска длительных космических полетов человека (например, на Луну или Марс). Для космических аппаратов, летающих на низких орбитах, опасность создает радиация, в основном, двух типов. Это – галактические космические лучи (ГКЛ)– ядра различных элементов - больших энергий - в диапазоне от сотен МэВ/нуклон до сотен ГэВ/нуклон, попадающие в окрестности нашей планеты из межзвездного пространства, а также – заряженные частицы, захваченные в магнитное поле Земли - радиационные пояса (РП). Последние как раз и представляют наибольшую опасность для низкоорбитальных космических аппаратов. Дело в том, что РП, хотя они и расположены на больших высотах, но в районе Южной Атлантики "провисают" над поверхностью Земли из-за аномальной структуры магнитного поля Земли. В этой области оно ослаблено по сравнению с другими областями. Поэтому, например, Международная космическая станция, летающая на высоте около 400 км, лишь только на 2х - 3х витках "задевает" эту опасную зону. Тем не менее, здесь существует радиационная опасность — это высокоэнергичные заряженные частицы - протоны и ядра более тяжелых элементов, захваченные в магнитное поле Земли. Их энергии достигают громадных энергий (для протонов до 1000 МэВ) и внешняя оболочка любого космического корабля для них - не преграда. Именно эти частицы и создают проблемы для бортовой электроники. Современная электроника - чипы - устройства высокой степени интеграции, зазоры между токопроводящими слоями которых достигают микроскопических размеров. Заряженные высокоэнергичные частицы, попадая в эту структуру, нарушают электрофизические свойства чипов, вызывая обратимые либо необратимые нарушения в их работе. В результате работа бортовых компьютеров нарушается, в них возникают сбои их работы.

К настоящему времени накоплен достаточно обширный экспериментальный материал, который однозначно позволяет сделать заключение, что район в области Южной Атлантики - наиболее опасный для электроники космических аппаратов, летающих на малых высотах. Наибольшее количество сбоев на самых разных космических аппаратах приходится именно на эту аномальную зону. Вне аномалии такие сбои электроники также возникают, но уже под воздействием ГКЛ. На таких высотах сбои возникают значительно реже, т.к. поток ГКЛ значительно меньше, чем частиц РП. Можно ли бороться с этим явлением? Следует признать, что это - актуальная проблема, далекая от завершения. Основная трудность заключается в том, что мы пока не знаем все стороны физических

процессов, происходящих внутри такого сложного устройства, каким является современная микросхема. Это - тот случай, когда новые технологии при взаимодействии с природными явлениями создают новые проблемы.

Интересно отметить, что схожие явления происходят и при взаимодействии тяжелых заряженных частиц и с биологическими структурами в космическом пространстве: это и нарушения ДНК, повреждения нейронов и многие другие явления. Они создают проблемы для длительных космических полетов в открытом космосе. Здесь потоки ГКЛ, среди которых есть и тяжелые частицы, могут вызвать ряд нежелательных явлений в биологических структурах, в том числе и необратимые. ТЗЧ могут вызвать изменения в структуре ДНК. Это связано с тем, что пространственные размеры энерговыделения тяжелых ядер в биоструктуре малы и сопоставим с размером самой клетки. Кроме этого, вода – основное вещество биологических тканей – под воздействием радиации ионизируется, в результате образуются свободные радикалы, которые могут разрушить молекулярные связи ДНК. Не исключен и сценарий прямого повреждения ДНК при торможении ТЗЧ. У некоторых астронавтов – ветеранов длительных космических полетов наблюдались серьезные хромосомные абберации» кровяных клеток, что может быть свидетельством начала развития канцерогенных образований. Эти образования могут и не вызвать рак, если они не будут подвержены дополнительным мутациям, но, несомненно, потенциально опасны. Другой пример: воздействие ТЗЧ на глаз человека могут привести повреждению клетчатки и хрусталика. Однако надо отметить, что в самом механизме взаимодействия ТЗЧ с клеточными структурами много неясного и сама проблема в рамках радиационной биологии далека от решения. Так, например, вероятность радиационных нарушений, описанных выше, не обязательно пропорциональна общей дозе радиации. Сами абберации разных типов по-разному соотносятся с величиной общей дозы: для одних аббераций необходимы малые дозы, для других – значительно большие. Не вполне ясен и синергетический эффект различных видов радиации: скажем, воздействие ТЗЧ наряду с гамма-излучением, электронами. Следует упомянуть и об изменении когнитивных функций высших млекопитающих при воздействии ТЗЧ, что экспериментально уже доказано радиобиологами. Причина этого – нарушения на молекулярном уровне, изучение которых также еще впереди.

Несомненно, что воздействие ТЗЧ на биоструктуры – в космосе – актуальная проблема как с точки зрения изучения природы этого явления, так и для обеспечения безопасности длительных космических полетов человека. С другой стороны, *схожесть результатов* эффектов воздействия ТЗЧ компонента космической радиации как на биоструктуры, так и на электронные чипы, наводит на мысль об использовании последних в качестве индикаторов потенциальной опасности, связанной с этими космическими частицами.

## ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ КАСКАДОВ СМЕЩЕНИЙ НА РАДИАЦИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

П.А. Карасев<sup>1)</sup>, А.И. Титов<sup>1)</sup>, К.В.Карабешкин<sup>1)</sup>, А.Ю.Азаров<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup> Университет города Осло, Осло, Норвегия

Для применения ионных пучков на практике необходимо понимать механизмы взаимодействия ускоренных частиц с мишенью, поскольку они определяют глубину, на которой остановится частица и те изменения в структуре вещества, которые она вызовет. Очевидно, что вид и особенности взаимодействия определяются, как свойствами вещества мишени, так и параметрами пучка налетающих ионов. Одним из таких важных параметров, влияющих на ход радиационно-стимулированных процессов, является плотность каскадов столкновений, образующихся вокруг траектории иона. Как следует из экспериментальных данных, этот параметр нетривиально влияет не только на скорость генерации и концентрацию первичных смещений, но и на процессы динамического отжига и вторичного дефектообразования.

В докладе будут описаны результаты комплексного, экспериментальными, теоретическими и расчётными методами, исследования процессов, сопровождающих ионное внедрение в полупроводниковые материалы при различных плотностях каскадов смещений, формируемых тормозящимися ионами. Рассмотрены методики, позволяющие определять параметры индивидуальных каскадов смещений, создаваемых как моноатомными, так и молекулярными ионами в твёрдом теле. Описаны выявленные закономерности, определяющие ход радиационных процессов и вклады различных физических механизмов.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-08-01213.

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ  
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ВОЛЬФРАМОВОГО  
ПОРОШКА С МИКРОННЫМ РАЗМЕРОМ ЗЕРЕН

В.И. Алексеев<sup>1),2)</sup>, А.Н. Елисеев<sup>1),2)</sup>, Э.Ф. Иррибарра<sup>3)</sup>,  
И.А. Кищин<sup>1),2)</sup>, А.С. Кубанкин<sup>1),2)</sup>, Р.М. Нажмудинов<sup>1),2)</sup>

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

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

<sup>3)</sup>Национальная политехническая школа, Кито, Эквадор

Выполнены экспериментальные исследования параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) релятивистских электронов, образующегося в вольфрамовом порошке марки ПВ1.

В качестве источника релятивистских электронов использовался микротрон с энергией 7 МэВ. Мишень была изготовлена из вольфрамового порошка с размерами зерен 0.8-1.7 мкм (по Фишеру). Измерение спектров ПРИ проводились под углами наблюдения 150° и 180° относительно скорости движения электронов. Поверхность мишени была ориентирована перпендикулярно оси пучка. В ходе эксперимента наблюдались рефлексы ПРИ от плоскостей (110), (200), (211), (220), (310) и (222).

Выполнены сравнения экспериментальных результатов с теорией [1] для шести наблюдаемых рефлексов ПРИ. Наблюдаются хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных по энергии, форме и относительной интенсивности пиков.

Тезис подготовлен при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук и докторов наук, проект № МД-5748.2018.2.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. V. Astapenko, N. Nasonov, P. Zhukova // Anomalous peak in the spectrum of polarizational bremsstrahlung from relativistic electrons moving through a solid target // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 40 (2007) 1337–1346.

**Секция II**

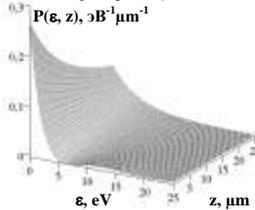
**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТЬЮ И  
НАНОСТРУКТУРАМИ (РАСПЫЛЕНИЕ, ВКЛЮЧАЯ  
РАСПЫЛЕНИЕ КЛАСТЕРАМИ, ФОРМИРОВАНИЕ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ НАНОСТРУКТУР И ИХ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ, ЭМИССИЯ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ)**



О ВЛИЯНИИ НЕКОГЕРЕНТНЫХ ПРОЦЕССОВ НА  
КАНАЛИРОВАНИЕ АТОМОВ ВОДОРОДА В НЕХИРАЛЬНЫХ  
УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ

Н.В. Максюта<sup>1)</sup>, В.И. Высоцкий<sup>1)</sup>, С.В. Ефименко<sup>1)</sup>,  
Е.В. Мартыш<sup>1)</sup>, Д.Н. Максюта<sup>1)</sup>, А.С. Сабиров<sup>2)</sup>  
<sup>1)</sup>КНУ имени Тараса Шевченко, Киев, Украина  
<sup>2)</sup>ЧГУ имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

В данной работе, основываясь на идеях, изложенных в [1], изучается влияние валентных электронов колеблющихся атомов нехиральных УНТ на процесс каналированного движения атомов водорода. На примере УНТ типа [10, 10] с помощью уравнения диффузии  $\partial P(\varepsilon, z)/\partial z = \partial [D(\varepsilon)\partial P(\varepsilon, z)/\partial \varepsilon] / 2\partial \varepsilon$  находится плотность вероятности  $P(\varepsilon, z)$  локализации частицы с поперечной энергией  $\varepsilon$  на расстоянии  $z$  от входа в канал УНТ [2] (3D-график этой функции изображен на рисунке).



С помощью  $P(\varepsilon, z)$  находится длина деканализации и рассчитывается пространственное распределение атомов водорода в УНТ, а также производится сравнение вкладов в это распределение за счет рассматриваемого механизма и за счет когерентного возбуждения (см. [1]).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Maksyuta N.V., Vysotskii V.I., Efimenko S.V., Martysh Ye.V., Maksyuta D.N., Sabirov A.S. // Abstract of the XII Intern. Symp. Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures, Hamburg (Germany), 2017, RREPS – 17, Book of Abstracts, P. 118.
2. Оцуки Е.-Х. Взаимодействие заряженных частиц с твердыми телами. – М.: Мир, 1985, 280 с.

## БЛИСТЕРООБРАЗОВАНИЕ В НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНКАХ ZrSiN, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

В.В. Углов<sup>1,2)</sup>, Г. Абади<sup>3)</sup>, С.В. Злоцкий<sup>1)</sup>, И.А. Солодухин<sup>1)</sup>,  
А.Д. Подобед<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

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

<sup>3)</sup>Институт Ф', Университет Пуатье, Пуатье, Франция

Работа посвящена исследованию процессов эрозии в нанокomпозитных пленках ZrSiN, облученных ионами He. Пленки с различной концентрацией Si формировались методом реактивного магнетронного распыления мишеней из Zr и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> при температуре 600°C. Методом рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии исследованы микроструктурные особенности в нанокomпозитных пленках после облучения ионами He (энергия 30 кэВ и дозы до  $1 \cdot 10^{15}$ – $8 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>) и пострadiационного отжига при 600°C.

Облучение ионами гелия до дозы  $8 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> не выявило эрозии поверхности в нанокomпозитных пленках. Обнаружено, что пострadiационный отжиг (He,  $5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>) при температуре 600°C приводит к образованию блистеров в нанокomпозитной пленке ZrSiN с наименьшей концентрацией Si (7,1 ат.%). Диаметр блистеров составляет 1 мкм, а высота – 150 нм. Для пленки ZrSiN с максимальной концентрацией кремния (23,1 ат.%) формирование блистеров не обнаружено.

В работе обсуждаются механизмы блистеринга в нанокomпозитных пленках ZrSiN после пострadiационного отжига в зависимости от концентрации кремния.

ВЛИЯНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ НА ИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЕ  
ГОФРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

В.А. Аникин<sup>1)</sup>, А.М. Борисов<sup>1)</sup>, А.В. Макунин,<sup>2)</sup>  
Е.С. Машкова<sup>2)</sup>, М.А. Овчинников<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>Московский авиационный институт

(Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

<sup>2)</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики

им. Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова,

Москва, Россия

Методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и лазерной гониофотометрии (ЛГФ) исследовали гофрированные структуры (углы наклона граней гофров и их доли) оболочки углеродного волокна ВМН-4 композита КУП-ВМ при высокодозном ( $\geq 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>) облучении ионами Ne<sup>+</sup> и Ag<sup>+</sup> энергии 30 кэВ и температурах мишеней от 200 до 600°C. При температурах, больших температур отжига радиационных нарушений в углеродных волокнах /1/, температурные зависимости параметров гофрированной структуры обнаруживают минимумы, соответствующие минимуму радиационно-индуцированного формоизменения углеродных материалов при температуре  $T_{\min} \sim 400^\circ\text{C}$  /2/. Диапазон углов наклона граней ионно-индуцированных гофров приходится на углы двойникования при пластической деформации модифицированного слоя оболочки волокна. Глубина минимума параметров гофрированной структуры при  $T_{\min} \sim 400^\circ\text{C}$  значительно больше в случае облучения ионами Ag<sup>+</sup>, обладающими большим коэффициентом распыления оболочки волокна по сравнению с Ne<sup>+</sup>, свидетельствуя о конкуренции пластической деформации модифицированного слоя оболочки волокна и распыления.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Петров Д.В. // Поверхность. 2014. №6. С. 6.
2. Виргильев Ю.С., Чугунова Т.К., Макаренченко В.Г., Муравьева Е.В. // Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. 1984. Т.20. №8. С.1378.

## ФОРМИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНОГО НАНОМАТЕРИАЛА НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА

В.С. Ковивчак<sup>1,2)</sup>

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

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

Высокотехнологичные методы формирования слоев наноструктурированного углерода на поверхности полимерных материалов представляют большой интерес для массового производства устройств мобильной электроники.

В настоящей работе для этих целей используется мощный протон-углеродный ионный пучок наносекундной длительности (МИП). Исследована морфология поверхности слоев хлорированного поливинилхлорида (ХПВХ), поливинилхлорида (ПВХ), композиции - поливинилхлорид (ПВХ) + поливинилиденхлорид (ПВДХ), винипроза (сополимера винилхлорида и метилметакрилата), поливинилацетата (ПВА), поливинилиденфторида (ПВДФ), поливинилового спирта (ПВС) с добавкой неорганических и органических соединений железа (до 10% от массы полимера), подвергнутых воздействию такого пучка. Показано, что при однократном воздействии такого пучка с плотностью тока до  $\sim 150\text{А/см}^2$  на слои ХПВХ, ПВХ, ПВХ+ПВДХ, винипроза, содержащие соединения железа, на облученной поверхности образуются аморфные углеродные нановолокна со средним диаметром 60-80 нм и длиной до 10 мкм. Образование подобных углеродных волокон (в меньшем количестве) наблюдается и на поверхности поливинилового спирта, содержащего хлорид железа после воздействия мощного ионного пучка с плотностью тока  $\sim 70\text{А/см}^2$ . На поверхности остальных исследованных полимеров после воздействия мощного ионного пучка углеродных волокон не обнаружено. Обсуждены возможные механизмы образования слоев наноструктурированного углерода при воздействии МИП.

ДЕГРАДАЦИЯ ПРОВОДИМОСТИ GaN ПРИ ОБЛУЧЕНИИ  
БЫСТРЫМИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

А.И. Титов<sup>1</sup>, П.А. Карасев<sup>1</sup>, А.И. Стручков<sup>1</sup>,  
А. Kumar<sup>2</sup>, R. Singh<sup>2</sup>, D. Kanjilal<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Inter-University Accelerator Centre, New Delhi, India

Известно, что ионное облучение проводящих слоев GaN может приводить к значительному (до 10 и больше порядков) росту их сопротивления. Это явление представляет определенный практический интерес для формирования электрической изоляции, а также для оценки радиационной стойкости приборов в условиях больших потоков быстрых ионов (например, в космосе).

В работе исследовалось изменение проводимости эпитаксиальных слоев n-GaN при их облучении ионами Ni, Ag, Au с энергиями ~100 МэВ при комнатной температуре, а также температуре жидкого азота. Сопротивление образцов измерялось *in-situ* методом Ван дер Пау.

Хотя подавляющими потерями энергии таких ионов являются *неупругие*, в работе показано, что деградация электропроводности слоев GaN хорошо описывается в рамках модели, предложенной ранее для легких ионов с энергиями ~10 МэВ [1]. В этой модели основной причиной роста сопротивления является генерация подвижных точечных дефектов в результате *упругих* потерь энергии. Такие точечные дефекты, взаимодействуя с атомами примеси, образуют комплексы «атом примеси»+«точечный дефект». Тогда, снижение концентрации носителей заряда происходит вследствие исчезновения мелких донорных уровней.

На базе этих представлений проведен анализ воздействия облучения ионами, которые имеют различные значения упругих потерь энергии.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-08-01213.

## ЛИТЕРАТУРА

1. A.I.Titov, S.O.Kucheyev // J. Appl. Phys., 2002, v. **92**, 5740.

РАЗРАБОТКА КЛАСТЕРНОГО ИСТОЧНИКА И ЕГО  
ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ СГЛАЖИВАНИЯ И ЧИСТКИ  
ПОВЕРХНОСТИ

В.О. Пеленович<sup>1)</sup>, X.M. Zeng<sup>1)</sup>, А.Б. Толстогузов<sup>1,2,3)</sup>, D.J. Fu<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Wuhan university, Wuhan, China

<sup>2)</sup> Tecnologia Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal

<sup>3)</sup>Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Рязань, Россия

Разработан газовый кластерный источник с энергией кластерных ионов до 20 кэВ. В качестве рабочих газов используются Ar, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>. Для формирования кластеров используется металлическое коническое сопло с диаметром критического сечения 0,1 мм и углом раствора конуса 14°. Для улучшения вакуумных условий применен импульсный режим питания сопла, что позволяет поднять давление газа в зоне стагнации до 15 атм. Для ионизации кластеров используется ионизация электронным ударом в цилиндрическом ионизаторе. Электроны эмитируются вольфрамовой нитью, энергия электронов до 300 эВ. Далее ускоренные ионы проходят через магнитное поле 0,3 Тл постоянного магнита, для удаления мономеров из пучка. Ток кластерных ионов с энергией 20 кэВ достигает 20 мкА, плотность тока 1 мкА/см<sup>2</sup>. Методом времяпролетной спектроскопии исследованы масс-спектры аргона при различных давлениях газа и энергии ионизирующих электронов. Средний размер кластеров определяется как функция параметра конденсации  $\Gamma^*$  для сопел с различным критическим сечением. Пучки кластеров CO<sub>2</sub> используются для сглаживания поверхности меди, титанового покрытия и прессованного нанопорошка кремния. В случае титана шероховатость уменьшается с 3,7 до 0,8 нм, также наблюдается удаление наночастиц Ti с поверхности покрытия. В случае кремния при ускоряющем напряжении 10 кВ на поверхности наблюдается образование кратеров со средним диаметром 100 нм.

## ЭВОЛЮЦИЯ НАНОСТРУКТУР ПРИ ОБЛУЧЕНИИ КЛАСТЕРНЫМИ ИОНАМИ

Д.С. Киреев, А.В. Данилов, С.Е. Панин, М.Ю. Воронина, А.Е.  
Иешкин, В.С. Черныш

Физический факультет МГУ, Москва, Россия

Исследование эволюции наноструктур под действием бомбардировки ионами представляет интерес как для понимания роли процессов, участвующих в формировании нанорельефа, так и с точки зрения формирования поверхностей с заданными параметрами топографии с помощью ионного облучения /1/.

В данной работе проведено исследование влияния дозы облучения кластерными ионами аргона, ускоренными до энергии 10 кэВ /2/, на предварительно сформированные кремниевые и углеродные упорядоченные структуры. Показано, что в случае объемных структур (пористый кремний, углеродные нанотрубки) происходит перестройка структуры с формированием новых nanoобразований. В случае двумерной структуры, сформированной на поверхности кремния, при нормальном падении кластерных ионов осуществляется постепенное сглаживание рельефа, в то время как при наклонном падении наблюдаются асимметричные структуры.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А.Е. Ieshkin, S.E. Svyakhovskiy, V.S. Chernysh, // Vacuum, 2018, vol. 148, p. 272
2. А.А. Andreev, V.S. Chernysh, Yu.A. Ermakov, А.Е. Ieshkin, // Vacuum, 2013, vol. 91, p. 47.

ПОЛУЧЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТОМ-  
ПОВЕРХНОСТЬ ИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ О  
РАССЕЯНИИ

П.Ю. Бабенко, Д.С. Мелузова,  
А.П. Шергин, А.Н. Зиновьев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Предложена процедура определения потенциала для системы налетающая частица - поверхность металла на основе анализа угловых распределений рассеянных частиц в режиме поверхностного каналирования. Описание рассеяния частиц проводилось путем компьютерного моделирования траекторий частиц с учетом тепловых колебаний решетки кристалла /1/. Учитывались взаимодействие налетающей частицы со всеми атомами, находящимися на расстоянии  $3d$  от траектории частицы ( $d$  - постоянная решетки кристалла).

Получены данные для рассеяния атомов Ag на поверхностях кристалла Al(111) и Ag(111) и атомов Ne, Ar и Kr на поверхности кристалла Al(001). Потенциальные значения и функциональные зависимости от межъядерного расстояния значительно отличаются от значений, даваемых известными моделями потенциалов описывающих бинарное взаимодействие атомов /2/. Это различие объясняется взаимодействием между налетающей частицей и электронами проводимости металлов и качественно согласуется с моделью отражающего зеркала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Babenko P.Yu., Meluzova D.S., Shergin A.P., Zinoviev A.N. // NIMB, 2017, v.406, p.460-464.
2. Зиновьев А.Н., Бабенко П.Ю., Мелузова Д.С., Шергин А.П. // В сб. трудов 47-й международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (ФВЗЧК-2017), Москва, Изд-во МГУ, 2017, с.50.

## ОСОБЕННОСТИ ДЕГРАДАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЫХ ЧАСТИЦ $\text{TiO}_2$ , $\text{ZnO}$ , $\text{SiO}_2$ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В.В. Нещименко<sup>1,3)</sup>, М.М. Михайлов<sup>2)</sup>, Чундун Ли<sup>3)</sup>

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

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

<sup>3)</sup> Харбинский политехнический университет, Харбин, КНР

Представлены результаты исследования оптических свойств и радиационной стойкости порошков на основе полых частиц  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ , а также соответствующие микро- и нанопорошки.

Полученные спектры диффузного отражения ( $\rho_d$ ) позволили установить, что исследуемые полые частицы  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  имеют меньшие значения коэффициента отражения во всем спектральном диапазоне по сравнению с микропорошками.

Радиационную стойкость исследуемых полых частиц оценивали относительно микро- и нанопорошков по разностным спектрам диффузного отражения ( $\Delta\rho_E$ ), полученных вычитанием спектров после облучения из спектров необлученных образцов.

Из полученных спектров  $\Delta\rho_E$  следует, что при воздействии протонами с энергией 100 кэВ флюенсом  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  в полых частицах  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  образуется меньше радиационных дефектов, чем в микропорошках. Облучение в таких же условиях полых частиц  $\text{ZnO}$  показало, что интенсивность полос поглощения радиационных дефектов близко совпадает с микропорошками.

Установлены особенности накопления радиационных дефектов в полых частицах  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ , из которых следует, что наибольшей радиационной стойкостью обладают полые частицы, по сравнению с микро- и нанопорошками. Из исследованных трех типов оксидных материалов наибольшей радиационной стойкостью при заданных условиях обладают полые частицы  $\text{SiO}_2$ .

ОБ ЭФФЕКТЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ  
В РАСПЫЛЕНИИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ  
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ

В.Н. Самойлов, Н.Г. Ананьева

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В ряде работ (см., например, /1-3/) использовались модели виртуальных веществ и сплавов для выяснения особенностей распыления двухкомпонентных мишеней. В настоящей работе с использованием модели молекулярной динамики проведено детальное сравнение характеристик прохождения ионов  $Kr^+$  и распыления передней и тыльной поверхностей тонких монокристаллических пленок дихлорида ванадия  $VSi_2$  и виртуальных кристаллов чистых ванадия  $VV'_2$  и кремния  $Si'Si_2$  (с кристаллической структурой  $VSi_2$ ). Два последних кристалла состояли из атомов одной массы. Оказалось, что в широком диапазоне энергий ионов  $Kr^+$  при равенстве масс и энергий связи атомов компонент преимущественно распылялись как назад, так и на прострел атомы из ванадиевых узлов. Эта особенность может быть связана с неидентичностью кремниевых и ванадиевых узлов по отношению к распылению. Механизм распыления атомов из ванадиевых узлов может быть отличен от механизма распыления атомов из кремниевых узлов в силу сложной структуры монокристалла  $VSi_2$  (типа C40) и разных механизмов распространения импульса по ванадиевой и кремниевой подрешеткам  $VSi_2$ . Эффект неидентичности узлов по отношению к распылению нужно учитывать при анализе элементного состава многокомпонентных монокристаллов методами SNMS и SIMS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Samoylov V.N. // Proc. 4th Int. Conf. of Plasma Chemistry and Technology, San Diego, USA, Technomic Publ., 1987, p. 117-144.
2. Shulga V.I., Sigmund P. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 1995, V. 103, № 3, p. 383-386.
3. Gades H., Urbassek H.M. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 1995, V. 102, № 1-4, p. 261-271.

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ФОКУСИРОВКИ  
РАСПЫЛЕННЫХ АТОМОВ ПРИ ЭМИССИИ  
С ПОВЕРХНОСТИ ГРАНИ (001) Ni

В.Н. Самойлов, А.И. Мусин

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В настоящей работе мы подводим промежуточный итог большой серии наших исследований (см., например, /1-3/) методами компьютерного моделирования эффектов фокусировки и перефокусировки распыленных атомов при эмиссии с грани (001) Ni. Расчеты были проведены по моделям 5 и 21 атомов. Для несимметричных относительно направления  $\langle 100 \rangle$  интервалов угла  $\varphi$  в распределениях распыленных атомов с одновременным разрешением по энергии и полярному углу различаются отдельные хребты – максимумы распределений для фокусированных и перефокусированных атомов, максимум распределения перефокусированных атомов наблюдается в области энергии и полярных углов, при которых нет вылета других групп атомов. Оказалось, что перефокусированные атомы очень чувствительны к выбору модели, что не так для фокусированных атомов. Обнаружена многозначность распределения перефокусированных атомов по начальному азимутальному углу вылета, в основе которой лежит многократное рассеяние эмитированного атома на атомах поверхности. Уменьшение числа фокусированных и перефокусированных атомов при магнитном  $p$ - $f$  переходе оказалось более сильным, чем уменьшение числа всех распыленных атомов. Также обсуждается важный практический вопрос, материалы с какой энергией связи нужно брать для лучшего разрешения максимумов фокусированных и перефокусированных атомов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Самойлов В.Н., Носов Н.В. // Поверхность, 2014, № 3, с. 81-92.
2. Самойлов В.Н., Мусин А.И., Ананьева Н.Г. // Известия РАН. Серия физическая, 2016, т. 80, № 2, с. 122-125.
3. Самойлов В.Н., Мусин А.И. // Известия РАН. Серия физическая, 2018, т. 82, № 2, с. 171-176.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ  
НАНОПОРИСТЫХ Si-СОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ В  
ПРОЦЕССЕ ИХ ФИЗИЧЕСКОГО РАСПЫЛЕНИЯ ИОНАМИ Ag  
НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

А.А. Сычева<sup>1,2)</sup>, Е.Н. Воронина<sup>1,2)</sup>, Т.В. Рахимова<sup>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

Изучение физико-химических механизмов ионно-стимулированного травления нанопористых SiOCH-пленок является одной из актуальных задач современной микроэлектроники. За счет воздействия ионов инертных газов с энергией до 200 эВ обеспечивается анизотропия плазменной обработки материала. Современные low-k диэлектрики представляют собой нанопористый аморфный материал на основе SiOx матрицы, структура которого может претерпевать существенные изменения под действием ионов инертных газов низкой энергии.

В данной работе представлены результаты моделирования методом молекулярной динамики процессов распыления нанопористых материалов на основе Si ионами Ag с энергией до 200 эВ. В качестве моделей использовались аналоги low-k материалов с различными радиусами пор (0,8–2,8 нм) и степенью пористости (22% и 44%). Результаты показали, что воздействие ионов на такие материалы приводит не только к увеличению интенсивности их распыления по сравнению со сплошной структурой, но и к значительным изменениям морфологии приповерхностных слоев. Исследованы особенности процесса распыления и возникающих структурных эффектов в зависимости от радиуса пор и степени пористости материала.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-12-01012 с использованием суперкомпьютера «Ломоносов».

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычева А.А., Воронина Е.Н., // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2018 (в печати).

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПЫЛЕНИЯ КРЕМНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ Ag-Si ПОТЕНЦИАЛОВ

А.А. Сычева<sup>1,2)</sup>, Е.Н. Воронина<sup>1,2)</sup>, А.П. Палов<sup>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

Физическое распыление широко применяется в современных технологических процессах обработки различных материалов. Компьютерное моделирование данного процесса обычно выполняется с помощью молекулярной динамики (МД) или на основе метода Монте-Карло (МК). Потенциалы, описывающие взаимодействие атомов мишени друг с другом и с налетающими ионами, могут оказывать существенное влияние на точность получаемых при моделировании результатов [1].

В данной работе для описания взаимодействия Ag-Si в расчетах применялись различные парные потенциалы, полученные с помощью *ab initio* методов многоконfigurационного взаимодействия и теории функционала плотности, а также потенциал Мольера. Коэффициенты физического распыления кремния ионами Ag низкой энергии (до 200 эВ) были рассчитаны методом МД (пакет LAMMPS) и методом МК с помощью разработанной в НИИЯФ МГУ программы MOTREV, в которой используются квантово-механические сечения упругого рассеяния, полученные на основе рассчитанных Ag-Si потенциалов. В работе анализируется влияние вида Ag-Si потенциала на коэффициент распыления и проводится сопоставление результатов МД и МК-расчетов.

Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-12-01012 и с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Hossain M.Z., Freund J.B., Johnson H.T., // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 2009, 267, 1061-1066.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ НЕУПРУГОГО  
РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ВОЛЬФРАМЕ

В.П. Афанасьев<sup>1)</sup>, А.С. Грязев<sup>1),2)</sup>, П.С. Капля,  
А.В. Рыбакова<sup>1)</sup>, Ю.В. Бодиско<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>АО «ВНИИНМ», Москва, Россия

Вольфрам – переходной металл, имеющий широкий набор технологических применений. Для количественного анализа поверхности на базе различных методик электронной спектроскопии необходима подробная информация о дифференциальных сечениях неупругого рассеяния электронов  $\chi_{in}(\Delta)$ . Следуя классической теории Ритчи /1/, мы различаем законы потерь энергии в приповерхностных слоях и однородном массиве. Размер слоя определяется как произведение скорости электрона на характерный для данного слоя период плазменных колебаний. Для переходных металлов характерно наличие нескольких мод плазменных колебаний в приповерхностных слоях, что заметно усложняет задачу.

С математической точки зрения задача восстановления  $\chi_{in}(\Delta)$  из экспериментальных спектров характеристических потерь энергии (ХПЭ) представляет обратную задачу, относящуюся к классу некорректных задач. В настоящей работе указанная задача решается на основе процедуры фитинга – многократного решения прямой задачи с варьируемыми сечениями  $\chi_{in}(\Delta)$  для каждого слоя.

В отличие от работы /2/, где  $\chi_{in}(\Delta)$  определялись на основе экспериментов ХПЭ “на прострел” ( $E_0 = 25$  кэВ) и ХПС ( $E_0 \sim 1,5$  кэВ), данная работа использует спектры ХПЭ “на отражение” ( $E_0 = 1,0–3,4$  кэВ). Результаты обработки экспериментов позволят с уверенностью описывать законы потерь энергии электронов в  $W$  для  $E_0 \sim 1–25$  кэВ.

Работа была выполнена в рамках государственного задания № 3.1414.2017.

## ЛИТЕРАТУРА

- a. Ritchie R.H. // Phys. Rev., 1957, v. 106, No. 5, p. 874.
- b. Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Efremenko D.S., Kaplya P.S., Kuznetcova A.V. // J. Phys.: Conf. Ser., 2017, v. 941, p. 012019.

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГРАФИТА НА  
ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ  
ВЫСОКОДОЗНОМ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Н.Н. Андрианова<sup>1)</sup>, А.М. Борисов<sup>1)</sup>, Е.С. Машкова<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> МАИ (НИУ), Москва, Россия

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

Перспективную для многих приложений аллотропную форму нанокристаллического графита в виде вертикальных графеновых наностенок получают обычно в различных неравновесных плазмохимических процессах /1/. Вместе с тем анализ накопленных данных показывает, что такая форма углерода получается и при ионно-лучевом модифицировании поверхности углеродных материалов. Приводятся и анализируются примеры формирования нанокристаллического графита при высокодозном облучении ( $>10^{18}$  см<sup>-2</sup>) ионами инертных газов поверхности алмазов, высокоориентированного пиролитического графита, стеклоуглерода и композитов, армированных углеродными волокнами. Анализируются данные РЭМ, спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), дифракции быстрых отраженных электронов и лазерной гониофотометрии. Образование нанокристаллического графита контролировали по характерному сдвигу максимума G-полосы в спектрах КРС /2/. Найдено, что образование нанокристаллического графита определяется типом углеродного материала и температурой облучаемой мишени. Так, для алмаза при повышенных температурах облучения наблюдается подавление формирования графитовых нанокристаллов с осью *c*, близкой к нормали к поверхности /3/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hiramatsu M., Hori M. Carbon nanowalls: synthesis and emerging applications. Springer. 2010
2. Ferrari A.C., Robertson J. // Phys.Rev. B. 2000. V.61. 14095
3. Андрианова Н.Н. и др.// Изв. РАН, сер.физ.2016.Т.80.175

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА РАСПЫЛЕНИЯ  
АМОРФНОГО КРЕМНИЯ ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ИОНАМИ  
АЗОТА И АРГОНА

В. И. Шульга

НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Бомбардировка кремния химически-активными ионами, такими как  $N_2^+$  и  $O_2^+$ , приводит к насыщению поверхностного слоя мишени имплантированными атомами, что может сильно влиять на характеристики распыления. Особый интерес представляет интервал углов падения  $\alpha = 35-70^\circ$ , для которого характерно формирование поверхностных волнообразных структур (напр. /1-3/). В данной работе проведено компьютерное моделирование распыления аморфного кремния ионами N с энергией 4.5 кэВ с учетом экспериментальных значений концентрации внедренных атомов /3/. Методика расчета аналогична использованной в /4/. Расчет выполнен для плоской поверхности и с учетом волнообразного рельефа. С целью сравнения с экспериментальными данными /3/ аналогичный расчет выполнен для ионов Ag с энергией 4.5 кэВ. Показано, что низкие значения коэффициента распыления кремния ионами азота при нормальном падении, наблюдавшиеся в экспериментах /1,3/, связаны в основном с подавлением физического распыления атомов матрицы в результате обогащения поверхности имплантированными частицами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wittmaack K., Poker D.B. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 1990. V.47. P.224.
2. Vajo J.J., Doty R.E., Cirilin E.-H. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1996. V.14. P.2709.
3. Bachurin V.I., Lepshin P.A., Smirnov V.K. // Vacuum. 2000. V.56. P.241.
4. Shulga V.I. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2017. V.412. P.207.

МОДИФИКАЦИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ МЕЖАТОМНОГО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТРЕХМЕРНЫХ  
АТОМНЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ УСКОРЕННОЙ  
МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Е. В. Дуда, Г. В. Корнич

Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

Рассмотрены методы гипердинамики (ГД) /1/ и температурно-ускоренной динамики (ТУД) /2/, а также их объединение в единый метод температурно-ускоренной гипердинамики (ТУГД) на примере трехмерных атомных систем с многочастичными межатомными потенциалами. Предложены способы модификации потенциалов взаимодействия, повышающие точность и достоверность ускоренного динамического моделирования.

Рассматриваемые варианты методов ГД, ТУД и ТУГД ранее тестировались на двумерных атомных системах меди с вакансией и адсорбированным атомом /3, 4/. В настоящем исследовании показано, что выборки, полученные методом классической молекулярной динамики (МД) и исследуемыми ускоренными методами на однотипных трехмерных системах, принадлежат одному закону распределения. Показано существенное, по сравнению с МД методом, ускорение вычислений, которое позволяет использовать предлагаемые версии динамических методов при моделировании процессов, связанных с термически-активируемыми переходами атомов. В частности, развитые в работе варианты методов ГД, ТУД и ТУГД могут быть применены для моделирования осаждения тонких пленок за интервалы времени, недоступные напрямую МД моделированию, однако сохраняющие, при этом, достоинства МД метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Voter A. F. // Phys. Rev. Let., 1997, 78, 3908.
2. Voter A. F. // J. Chem. Phys., 1997, 106, 4665.
3. Дуда Е. В., Корнич Г. В. // Поверхность, 2017, №7, 89.
4. Дуда Е. В., Корнич Г. В. // ФТТ, 2017, №10, 1879.

ФОРМИРОВАНИЕ И ПАССИВАЦИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ  
МЕЗАСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ InGaN/GaNИ.П. Сошников<sup>1)</sup>, К.П. Котляр<sup>1)</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>1)</sup>И.А. Морозов<sup>1)</sup>, Т.Н. Березовская<sup>1)</sup>, В.В. Лисак<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Академический университет, СПб, Россия

Формирование наноразмерных мез на основе планарных гетероструктур III-V материалов является перспективным методом повышения эффективности светоизлучающих приборов [1]. Представленная работа направлена на исследование формирования массива мез на основе планарных InGaN/GaN гетероструктур в результате плазмохимического травления в смеси газов  $\text{BrCl}_3/\text{Cl}_2$  через Ni масочные покрытия и изучение процессов пассивации дефектов на границах наноразмерной мезы.

Изучено влияние параметров травления на морфологические характеристики полученных массивов наноразмерных мез (определены скорости травления и бокового подтравла). Удаление дефектов и пассивация боковой поверхности наноразмерных мез проводилась быстрым термическим отжигом и/или химическим жидкостным травлением в различных растворах с использованием  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{KOH}$ . В частности, изучено влияние условий обработки на интенсивность фотолюминесценции и исследован процесс полировки боковой поверхности мезоструктур при химическом травлении в растворе  $\text{KOH}$ . Исследование спектров люминесценции показывает увеличение интенсивности излучения по сравнению с планарным образцом идентичной приведенной площади.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям по программе УМНИК (№10865ГУ/2016), гранта 18-07-01364 А. Авторы выражают благодарность Цацульникову А.Ф. за предоставление гетероструктур InGaN/GaN.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Y.-L. Tsai, K.-Y. Lai, M.-J. Lee, Y.-K. Liao, B. S. Ooi, H.-C. Kuo, J.-H. He, Progress in Quantum Electronics, 2016, 49, p.1–25.

## ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК GaAlAs/GaAs

С.Б. Донаев, Б.Е. Умирзаков, С.Ж. Ниматов, Н.М. Мустафаева  
Ташкентский государственный технический университет

Настоящая работа посвящена изучению энергетических и угловых зависимостей коэффициентов вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ), коэффициентов отражения и поглощения света пленкой Ga<sub>0,5</sub>Al<sub>0,5</sub>As/GaAs.

На основе анализа полученных результатов о структуре, эмиссионных и оптических свойствах тонких пленок GaAlAs/GaAs можно сделать следующие выводы:

Зонно-энергетические параметры, эмиссионные свойства и параметры решетки тонких пленок ( $d \approx 50 - 100 \text{ \AA}$ ) GaAlAs, полученных методами МЛЭ и ионной имплантацией мало отличаются друг от друга. В случае пленок, полученных методом ионной имплантации, кристаллографическая ориентация пленки и подложки хорошо совпадают друг с другом.

Глубина зоны выхода ИВЭ и фотоэлектронов для GaAs составляет  $\sim 100-120 \text{ \AA}$ , а для пленки Ga<sub>0,5</sub>Al<sub>0,5</sub>As –  $150-160 \text{ \AA}$ . Значение коэффициентов  $\eta$  соответственно для GaAs и Ga<sub>0,5</sub>Al<sub>0,5</sub>As практически идентичны, а значения коэффициентов ИВЭ  $\delta_m$  отличаются на 20-25 %. Коэффициент отражения света  $K$  во всей исследованной области длины волны (как в области поглощения, так и в области максимального отражения) GaAlAs был до 2 раза больше чем GaAs. Прогрев системы GaAlAs/GaAs при  $T \approx 600^0 \text{ C}$  в течение 5-10 мин приводил к некоторому уменьшению  $K$  в области интенсивного поглощения света ( $\lambda \leq 580 \text{ nm}$ ). Одной из причин этого может быть наличие в пленках GaAlAs некоторых избыточных атомов Ga или As.

Таким образом, показано, что формирование на поверхности GaAs нанопленок GaAlAs приводит к увеличению значения коэффициента ИВЭ и квантового выхода фотоэлектронов, что объясняется отличием глубины зоны выхода ИВЭ  $\lambda$  GaAs и GaAlAs.

ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА ПЛЕНОК GaAs и  $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ 

Б.Е. Умирзаков, С.Б. Донаев, Д.А. Ташмухамедова  
Ташкентский государственный технический университет

В данной работе на основе совместного анализа спектров фото- и упруго отраженных электронов построены примерные зонно-энергетические диаграммы пленки GaAs, нанопленки ( $\theta = 40 \text{ \AA}$ ) и нанокристалла ( $d = 15 - 20 \text{ нм}$ )  $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ . При построении диаграммы предполагалось, что форма спектра фотоэлектронов полностью совпадает с плотностью состояний валентных электронов, а положение особенностей на спектрах упруго отраженных электронов равно расстоянию между максимумами заполненных и свободных электронных состояний. Отметим, что для нанопленок и нанокристаллов  $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$  не только параметры энергетических зон, но и плотности состояния электронов существенно отличаются друг от друга.

На рисунке приведена условная зонно-энергетическая диаграмма поверхности GaAs с нанокристаллами  $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ . Эти системы могут быть полезными в создании нанотранзисторов, наноразмерных ИС, опто- и фотоэлектронных устройств.

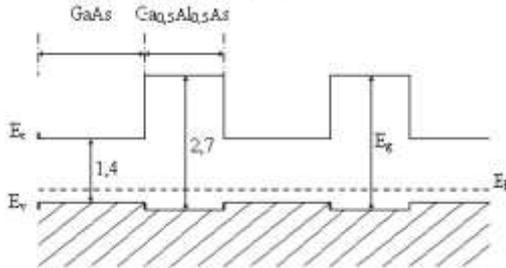


Рис. 1. Зонно-энергетическая диаграмма поверхности GaAs с нанокристаллами  $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$

Таким образом, установлено, что методом ионной имплантации в сочетании с отжигом можно получить наноструктуры типа  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ . Изменяя температуру прогрева и плотности лазерного отжига, можно изменять значение  $x$  в пределах 0,1 – 0,6.

ФОРМИРОВАНИЕ ОБОЛОЧЕЧНЫХ СТРУКТУР ИЗ  
БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЯНУСОПОДОБНЫХ НАНОКЛАСТЕРОВ  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКИ

Д.В. Широкоград<sup>1)</sup>, Г.В. Корнич<sup>1)</sup>, С.Г. Буга<sup>2),3)</sup>

<sup>1)</sup>Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

<sup>2)</sup>ФГБНУ “Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов”, г. Москва, г. Троицк, Россия

<sup>3)</sup>Московский физико-технический институт (ГУ МФТИ), Московская обл., г. Долгопрудный, Россия

В рамках молекулярной динамики моделировалась эволюция до 500 пс 390-атомных свободных кластеров Cu-Au и Cu-Vi в условиях низкоэнергетической бомбардировки частицами Ag<sub>1</sub> и Ag<sub>13</sub>. Начальные янусоподобные кластеры состояли из двух монокомпонентных частей с небольшим взаимным перекрытием и равным числом атомов /1/.

При бомбардировке частицами Ag<sub>13</sub> кластера Cu-Vi с энергией не менее 300 эВ наблюдалось образование нечетких оболочечных структур с преимущественно медным ядром, покрытым обогащенным атомами Vi слоем. Наблюдалось практически гомогенное перемешивание атомов Cu и Au с незначительным преобладанием атомов Cu во внутренних и атомов Au во внешних слоях кластера Cu-Au. Для Ag<sub>1</sub> аналогичные процессы менее интенсивные и приводят к эксцентрическому расположению как внутреннего, обогащенного медью ядра в кластере Cu-Vi, так и неоднородной смеси компонентов с все еще более высокой внутренней концентрацией золота в кластере Cu-Au. Выход распыления с учетом термического механизма почти на порядок выше в случае Ag<sub>13</sub> для обоих кластеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. D.V. Shyrokorad, G.V. Kornich, S.G. Buga // J. Surf. Investig. X-Ray, Synchrotron Neutron Tech., 2017, 11, №3, 639–645.

## ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ВОЛЬФРАМА

А.М. Бакаева <sup>1)2)</sup>, А.В. Дубинко <sup>1)</sup>, Е.Е. Журкин <sup>3)</sup>,

Д.А. Терентьев <sup>1)</sup>, А. Де Баккер <sup>4)</sup>, А.В. Бакаев <sup>1) 3)</sup>

<sup>1)</sup> Бельгийский центр ядерных исследований, Мол, Бельгия

<sup>2)</sup> Университет Гента, Гент, Бельгия

<sup>3)</sup> Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4)</sup> Центр изучения термоядерной энергии в Кулхэме, Кулхэм, Великобритания

Благодаря своим уникальным свойствам, вольфрам (W) будет использован в качестве материала дивертора международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР). Поверхность дивертора должна выдерживать высокие температуры и флюенсы компонентов плазмы и быстрых нейтронов. Свойства W могут изменяться под влиянием нейтронного облучения, приводящего к образованию дефектов кристаллической решетки, которые могут усилить захват компонентов плазмы и привести к охрупчиванию и растрескиванию материала дивертора.

В данной работе рассмотрено влияние облучения тяжелыми ионами на микроструктуру и поверхностное упрочнение W. Образцы экспонировались при комнатной температуре ионами W<sup>+</sup> с энергией 2 МэВ на ускорителе ТАМІА в университете Хельсинки. Дозы радиационного повреждения составили 0.01, 0.1 и 1 сна (смещений на атом).

Изменения поверхностной твердости облученных образцов исследовались методом наноиндентирования (НИ), а их микроструктура – с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ). Обнаружено, что облучение до дозы 0.1 сна не влияет на поверхностную прочность, тогда как увеличение дозы до 1 сна вызывает возрастание твердости. Данные ПЭМ показывают, что увеличение дозы облучения с 0.1 до 1 сна соответствует увеличению среднего размера дислокационных петель с 2.5 до 10 нм и их плотности с 0.8 до  $1.5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$  соответственно.

РАСЧЕТ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА  
ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ КАТОДА С ТОНКОЙ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ ОТ ЕЕ ТОЛЩИНЫ И  
ТЕМПЕРАТУРЫ В СЛАБОТОЧНОМ ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ

М.Р. Фишер, Мьо Ти Ха, В.И. Кристя  
Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Калуга, Россия

Для улучшения эмиссионных свойств катодов газоразрядных приборов на их поверхности часто формируют диэлектрические оксидные пленки. В разряде, вследствие бомбардировки катода ионами, происходит накопление на поверхности пленки положительного заряда, что обуславливает возникновения полевой, а при достаточного для появления полевой, а при достаточно высокой температуре электрода – термополевой и термической эмиссии электронов из металлической подложки электрода в пленку. Некоторая доля таких электронов может преодолевать потенциальный барьер на границе пленки и выходить в разрядный объем, увеличивая эффективный коэффициент эмиссии электрода /1,2/. Однако его зависимость от параметров пленки и характеристик разряда изучена недостаточно.

В данной работе построена модель, слабоочного газового разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки и рассчитана зависимость его эффективного коэффициента эмиссии от толщины пленки и температуры.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания «Организация проведения научных исследований» Минобрнауки РФ в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Проект 3.8408.2017/6.7).

ЛИТЕРАТУРА

1. G.G. Bondarenko, M.R. Fisher, V.I. Kristya // Vacuum, 2016, V.129, P.188.
2. Г.Г. Бондаренко, В.И. Кристя, Д.О. Савичкин // Известия вузов. Физика, 2017, Т. 60, №2, С. 129.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ИОНОВ И АТОМОВ И  
КОЭФФИЦИЕНТ РАСПЫЛЕНИЯ КАТОДА  
В СЛАБОТОЧНОМ РАЗРЯДЕ  
В СМЕСИ АРГОН-РТУТЬ

Д.О. Савичкин, М.Р. Фишер, В.И. Кристя  
Московский государственный технический университет им. Н.Э.  
Баумана, Калужский филиал, Калуга, Россия

В газоразрядных осветительных лампах в качестве рабочей среды используется смесь аргона с парами ртути, состав которой зависит от температуры, так как концентрация насыщенных паров ртути возрастает с ее увеличением. Влияние данного фактора на перенос частиц и кинетику межчастичных взаимодействий в слабо-точном разряде в смеси аргон-ртуть исследовано в работах [1,2]. Зависимость же энергий ионов и быстрых атомов от температуры смеси в таком разряде ранее не изучалось.

В данной работе построена численная модель движения ионов и образующихся при их столкновениях с атомами аргона быстрых атомов в разряде в смеси аргон-ртуть, основанная на использовании метода Монте-Карло. Рассчитаны энергетические спектры ионов и атомов компонент смеси, а также их вклады в распыление катода как функции температуры смеси.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания «Организация проведения научных исследований» Минобрнауки РФ в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Проект 3.8408.2017/6.7).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко Г.Г., Фишер М.Р., Кристя В.И. // Журнал технической физики, 2017, Т. 87. № 2, С. 197.
2. Бондаренко Г.Г., Дубинина М.С., Фишер М.Р., Кристя В.И. // Известия вузов. Физика, 2017, Т. 60, № 12, С. 48.

СТИМУЛИРОВАННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ  
ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕМ В КРИСТАЛЛАХ  $\text{SiO}_2$

Б.Г. Атабаев<sup>2)</sup>, У.Б. Шаропов<sup>1)</sup>, Р. Джаббарганов<sup>2)</sup>

- <sup>1)</sup> Ташкентский государственный технический университет  
им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан  
<sup>2)</sup> Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им.  
У.А. Арифова, Ташкент, Узбекистан

Вторичные ионы, которые регистрируются в масс-спектрах, могут быть продуктами рекомбинации /1/ или прямой эмиссии /2/ из решетки, а также могут возникать в результате дефектообразования на поверхности кристалла /3/. Почти во всех работах по распылению утверждается, что дефекты стимулируют образование вторичных кластеров. Образование дефектов при распылении кристаллов рассматривалось в как результат формирования автолокализованных экситонов, таких как электронно-дырочные пары, которое сопровождается возбуждением валентной зоны. В некоторых диэлектрических материалах (щелочно-галогидные кристаллы,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) дефекты могут быть образованы при бомбардировке электронами (электронно-стимулированная десорбция) и фотонами (фотонно-стимулированная десорбция).

Результаты, полученные методами спектроскопии полного тока и вторично-ионной масс-спектрометрии при ионном облучении кристаллов  $\text{SiO}_2$ , показывает, что основная часть продуктов распыления кристаллов содержит точечные дефекты. Обнаруженные при ионном облучении точечные дефекты на поверхности кристаллов  $\text{SiO}_2$  не только стимулируют процесс распыления кластеров, но и могут быть выбиты с поверхности вместе со вторичными ионами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джемилев Н.Х., // Поверхность, 2012, №8, С. 28.
2. Wittmaack K., // Phys. Lett., 1979, V.69, №5, P. 322.
3. Sharopov U.B. & oth., // Journal of Surface Investigation, 2016, Vol. 10, №1, P. 250.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОРОГ АТОМАРНОГО И КЛАСТЕРНОГО  
РАСПЫЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ  
БОМБАРДИРОВКЕ ИОНАМИ Cs, Rb, Na

Р. Джаббарганов<sup>1)</sup>, Б.Г. Атабаев<sup>1)</sup>, З.А. Исаханов<sup>1)</sup>,  
У.Б. Шаропов<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup> Ташкентский государственный технический университет  
им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

Исследованы выходы отрицательно заряженных кластерных ионов, эмитированных из кремниевой мишени КДБ-10р Si(III) при бомбардировке поверхностей ионами различных щелочных металлов с энергией от 0,1 до 3 кэВ.

Экспериментальные значения пороговой энергии распыления отрицательных ионных кластеров Si показывают увеличение значения порога энергии распыления с ростом числа атомов в кластере, а также с увеличением массы первичных ионов на примере Na, Rb, Cs. Расчеты значений пороговых энергий распыления для атомов и кластеров, сделанные по формулам Bohdansky, показывают уменьшение пороговых энергий распыления с увеличением массы первичных ионов (Ag, Cs) и увеличение пороговых энергий распыления с ростом числа атомов в кластере (Si, Si).

Оценка пороговых энергий распыления атомарных частиц, сделанная нами на основе компьютерного моделирования методом молекулярной динамики, выполненным в работе /1/, позволяет выявить для легких ионов (отношение масс  $M_{и}/M_{а}$  в пределах 0,6-3) удовлетворительное согласие с расчетами - уменьшение пороговых энергий распыления с увеличением массы первичных ионов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Сошников И.П., // Поверхность, 1999, №8, С. 76.

УДЕРЖАНИЕ КЛАСТЕРОВ ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ В ЯДРЕ  
КРАЕВОЙ И ВИНТОВОЙ ДИСЛОКАЦИИ В ВОЛЬФРАМЕ,  
ОБЛУЧЕННОМ ПЛАЗМОЙ

А.В. Бакаев<sup>1)2)</sup>, Е.Е. Журкин<sup>2)</sup>, Д.А. Терентьев<sup>1)</sup>,  
Ю.А. Мастриков<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Бельгийский центр ядерных исследований, Мол, Бельгия

<sup>2)</sup> Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра  
Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3)</sup> Латвийский университет, Рига, Латвия

Вольфрам является кандидатным материалом для облицовки внутренней стенки и дивертора в термоядерных реакторах. В процессе эксплуатации изделия из вольфрама будут подвергаться облучению частицами плазмы (изотопами водорода и гелия), что будет приводить к удержанию данных продуктов внутри материала и, как следствие, к ухудшению его термомеханических свойств.

В настоящее время ведется разработка и уточнение физических моделей для численной оценки количества удержанных продуктов плазмы и их распределения по глубине. В таких моделях одними из важнейших параметров являются энергии связи водорода и гелия с дефектами кристаллической структуры, такими как вакансии, междоузлия и их кластеры, дислокации различного типа и границы зерен и др.

Ранее с помощью численных расчетов с использованием теории плотностного функционала (из первых принципов) были рассчитаны энергии связи одиночных атомов водорода и гелия с ядром краевой и винтовой дислокаций в вольфраме. В данной работе исследуется возможная синергия взаимодействия атомов водорода и гелия в ядре таких дислокаций путем сравнения энергии связи кластеров водорода и гелия с дислокацией с таким же взаимодействием одиночных атомов. Полученные структуры кластеров водорода и гелия возле дислокаций анализируются с помощью исследования изоповерхностей электронной плотности и межатомных связей с окружающими кластеры атомами вольфрама.

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ МАСС ЧАСТИЦ НА  
ОСОБЕННОСТИ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ИОННОЙ  
ИМПЛАНТАЦИИ В УСЛОВИЯХ КАНАЛИРОВАНИЯ

Ф.Ф. Умаров<sup>1</sup>, А.А. Джурахалов<sup>2</sup> А.М. Расулов<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>University of Antwerp, Antwerp, Belgium

<sup>3</sup> Политехнический институт, Фергана, Узбекистан

В работе методом компьютерного моделирования исследованы характерные особенности процесса приповерхностной ионной имплантации в условиях каналирования, обусловленные различным соотношением масс сталкивающихся частиц  $\mu = m_2/m_1$ , где  $m_2$  и  $m_1$  - массы атома мишени и налетающего иона, соответственно. Исследовались пробеги, потери энергии и профили распределения ионов  $P^+$  с энергией  $1 \div 5$  кэВ при нормальном падении на поверхности монокристаллов Si(110) и SiC(110). Значения  $\mu$  для ионов  $P^+$ , сталкивающихся с атомами Si и C меньше 1 и равны  $\sim 0.9$  и  $0.39$ , соответственно (обратное соотношение масс). Исследована динамика изменения характера траекторий, пробегов, потерь энергии ионов  $P^+$  в тонких кристаллах Si(110) и SiC(110), а также угловые и энергетические распределения ионов, прошедших сквозь тонкие кристаллы. Эффект каналирования в случае обратного соотношения масс сталкивающихся частиц обладает рядом особенностей, связанных с существованием граничного угла рассеяния  $\theta_{lim} = \arcsin \mu$  в однократном столкновении, а также тем, что рассеяние на данный угол  $\theta < \theta_{lim}$  возможно при двух значениях прицельного параметра. Поэтому энергия рассеянного иона является двузначной функцией угла рассеяния. Установлено, что пробеги ионов и максимальная глубина профиля распределения уменьшаются с уменьшением параметра решетки и масс атомов мишени ( $m_C < m_{Si}$ ). Показано, что основной вклад в полные потери энергии вносят неупругие потери. Наличие тяжелых атомов в решетке приводит к деканалированию части параксиального пучка и уменьшению пробегов.

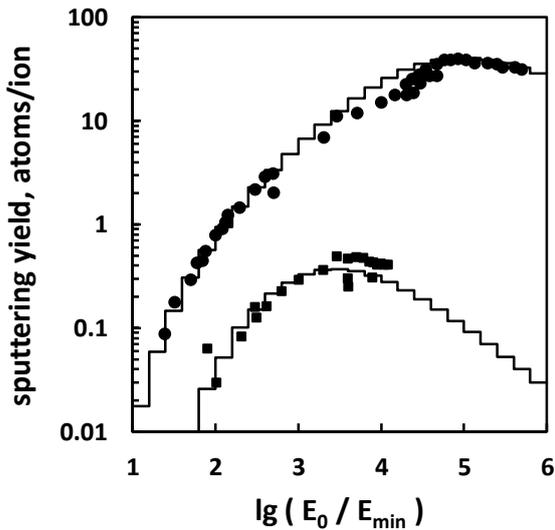
РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА РАСПЫЛЕНИЯ  
ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА ИОНАМИ:  
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕОРИЯ

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

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

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

Создана программа компьютерного моделирования для исследования распыления твердых тел под действием ионной бомбардировки. Программа PAOLA.SP основана на усеченном кулоновском потенциале, приближении парных столкновений и модели локальных неупругих потерь энергии /1/. Для потенциала твердых сфер построена теория распыления, подтверждающая корректность алгоритма. На рисунке показаны результаты моделирования зависимости коэффициента распыления от энергии для комбинаций серебро – серебро (верхняя гистограмма) и гелий – серебро (нижняя гистограмма), маркеры – эксперимент /2/.



ЛИТЕРАТУРА

1. Толмачев А. И., Форлано Л. // ЖТФ, 2017, том 87, с. 973.
2. Behrish R., Eckstein W. (editors). Sputtering by Particle Bombardment. Berlin, Springer, 2007. – 470 p.

ПРОГРАММА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ОТРАЖЕНИЯ ИОНОВ ОТ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

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

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

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

Разработана программа компьютерного моделирования для исследования отражения ионов от поверхности твердого тела. Для любых комбинаций ион – мишень программа PAOLA вычисляет коэффициент отражения, энергетическое и угловое распределения отраженных частиц как функции энергии и угла падения ионов  $/1/$ . Проведена апробация программы путем сравнения ее результатов с теорией, построенной для частного случая взаимодействия частиц по закону твердых сфер. В таблице приведены зависимости коэффициента отражения  $R_N$  от энергии  $E_0$ , выраженной в единицах энергии отсечки  $E_{th}$ , для различных отношений массы иона  $M_1$  к массе атома мишени  $M_2$ . При изменении энергии в  $10^6$  раз расхождение результатов моделирования и теории не превышает 0,4%, что находится в пределах погрешности методики Монте Карло. Таблица подтверждает корректность выбранного алгоритма, а также может служить для тестирования новых программ.

$E_0/E_{th}$	$M_1/M_2 = 1,0$		$M_1/M_2 = 0,1$	
	THEORY	PAOLA	THEORY	PAOLA
$10^1$	0,0047	0,0047	0,5594	0,5591
$10^2$	0,0719	0,0719	0,6759	0,6740
$10^3$	0,1564	0,1564	0,7295	0,7295
$10^4$	0,2264	0,2264	0,7654	0,7639
$10^5$	0,2825	0,2825	0,7871	0,7878
$10^6$	0,3283	0,3283	0,8063	0,8056
$10^7$	0,3666	0,3665	0,8165	0,8196

ЛИТЕРАТУРА

1. Толмачев А. И., Форлано Л. // Тезисы докладов XLVII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М.: «Университетская книга», 2017. С. 78.

ВЛИЯНИЕ СИЛЬНОПОЛЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ НА  
ЗАРЯДОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ  
МДП-СТРУКТУР ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИОННЫХ  
ИЗЛУЧЕНИЙ

Д.В. Андреев<sup>1)</sup>, Г.Г. Бондаренко<sup>2)</sup>, В.В. Андреев<sup>1)</sup>,  
В.М. Масловский<sup>3)</sup>, А.А. Столяров<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> МГТУ им. Н.Э.Баумана, Калужский филиал,  
Калуга, Россия

<sup>2)</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа  
экономики», Москва, Россия

<sup>3)</sup> НИИ Физических проблем им. Ф.В. Лукина,  
Зеленоград, Россия

В данной работе проведено исследование влияния сильнополевой туннельной инжекции электронов на зарядовые явления в диэлектрических пленках МДП-структур при воздействии  $\alpha$ -частиц, протонов, электронов и гамма-излучения.

На основе полученных экспериментальных данных разработана модель процессов изменения зарядового состояния МДП-структур при одновременном воздействии сильнополевой туннельной инжекции электронов /1/ и радиационных излучений, учитывающая взаимодействие инжектированных электронов с зарядами, возникающими в диэлектрической пленке вследствие радиационной ионизации. Показано, что режим сильнополевой инжекции электронов стимулирует процессы радиационной ионизации и ускоряет перемещение зарядов в объеме диэлектрической пленки, что позволяет существенно увеличить чувствительность МДП-сенсоров при контроле интегральной поглощенной дозы радиационных излучений.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана Минобрнауки РФ (проект №8.6779.2017/8.9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Andreev D.V. // Phys. Status Solidi C. 2015. Vol.12. No. 1–2. P. 126–130.

ДИНАМИЧЕСКИЙ ОТЖИГ ИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ  
РАДИАЦИОННЫХ НАРУШЕНИЙ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ  
ТЕМПЕРАТУРЕ ОБЛУЧАЕМОГО АЛМАЗА

А.М. Борисов<sup>1)</sup>, В.А. Казаков<sup>2)</sup>, Е.С. Машкова<sup>3)</sup>,  
М.А. Овчинников<sup>1,3)</sup>, Е.А.Питиримова<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>МАИ (НИУ), Москва, Россия;

<sup>2)</sup>ГНЦ - ФГУП «Центр Келдыша», Москва, Россия;

<sup>3)</sup>НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

<sup>4)</sup>Физический факультет ННГУ имени Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Эксперименты с облучением природного алмаза ионами углерода при повышенных температурах показывают возможность динамического отжига радиационных нарушений в алмазе /1,2/. В настоящей работе с целью исследования динамического отжига алмаза проведены измерения проводимости, спектроскопия КРС, РФЭС и ДОБЭ для случаев облучения ионами инертных газов, азота и углерода с энергий 30 кэВ в интервале температур облучаемого алмаза от комнатной до 720 °С. Показано, что поверхностный слой на алмазе после облучения ионами углерода с флуенсом  $\sim 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> при  $T = 650^\circ\text{C}$  дает точечную дифракционную картину, соответствующую облучаемой грани кристалла. Стократное повышение слоевого сопротивления  $R_s$  по сравнению с облучением при  $T = 250^\circ\text{C}$  обусловлено, согласно данным РФЭС, графитоподобным слоем на поверхности толщиной порядка единиц нанометров, при общей толщине модифицированного слоя около 200 нм. Повышение  $R_s$  при облучении ионами инертных газов при  $T > 400^\circ\text{C}$  предполагает, как и в случае с облучением углеродом, наличие динамического отжига радиационных нарушений в алмазе, не наблюдающегося при высокотемпературном облучении ионами азота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nelson R. S., Hudson J. A., Mazey D. J., Piller R. C. // Proc. R. Soc. London A. 1983. V386. P. 211.
2. Prins J.F., Derry T.E. // Nucl. Inst. Meth. in Phys. B. 2000. V.166-167. P.364.

## ИОННО-ЛУЧЕВОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ НАНОГЛОБУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ СТЕКЛОУГЛЕРОДА

А.М.Борисов<sup>1)</sup>, В.А.Казаков<sup>2)</sup>, А.В.Макунин<sup>3)</sup>, Е.С.Машкова<sup>3)</sup>,  
М.А. Овчинников<sup>1,3)</sup>

<sup>1)</sup>Московский авиационный институт

(Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

<sup>2)</sup>Исследовательский центр имени М.В. Келдыша, Москва, Россия

<sup>3)</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики  
им. Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

Методами РЭМ и спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) при лазерном возбуждении с длинами волн 488 и 514 нм исследованы структурные и морфологические изменения стеклоуглерода СУ-2500, вызываемые термообработкой и высокодозным ( $\geq 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>) облучением ионами Ag<sup>+</sup> энергии 30 кэВ. Найдено, что аморфизированное состояние поверхностно слоя после облучения при РТ не является термостабильным - широкая полоса в спектре КР трансформируется при отжиге с конечной температурой 600°C в характерный для графитов спектр с разделенными G- и D-пиками. Разделенные G- и D-пики наблюдаются также при температуре, превышающей температуру динамического отжига радиационных нарушений (около 120°C по данным мониторинга ионно-электронной эмиссии /1/) с наилучшим разделением пиков при температуре 600°C. Увеличение с температурой облучения интенсивности D-пика и смещение G-пика в сторону больших частот говорит согласно /2/ о формировании нанокристаллического графита. Наноглобулярная морфология трансформируется в наночастицу с зависящим от температуры облучения размером ячеек и толщины их стенок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Авилкина В.С., Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С.//Поверхность. 2012. №8. С.3
2. Ferrari A.C., Robertson J.//Phys.Rev. B. 2000. V.61. No.20. P.140095.

О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ОСТЫВАНИЯ  
МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛАНАРНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ  
МИШЕНИ, ОБЛУЧЁННОЙ ШИРОКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ  
ПУЧКОМ

Ю.А. Гладышев, В.В. Калманович, М.А. Степович  
ФГБОУ ВО «Калужский государственный университет  
им. К.Э. Циолковского», Калуга, Россия

Рассмотрен процесс остывания многослойной планарной полупроводниковой мишени, облучённой широким электронным пучком. Моделирование проводилось разрабатываемым нами новым матричным методом совместно с применением аппарата обобщенных степеней Берса. Некоторые возможности этого подхода для аналитического построения решений стационарного и нестационарного уравнений тепломассопереноса для произвольного числа слоев показаны в работах /1/, /2/. Метод сводится к последовательному умножению функциональных матриц, компоненты которых в каждой точке определяются физическими и геометрическими параметрами текущего слоя. Получены результаты моделирования для различных многослойных полупроводниковых структур.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-03-00515), а также РФФИ и правительства Калужской области (проект № 18-41-400001).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гладышев Ю.А., Калманович В.В., Степович М.А. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2017, № 10, с. 105-110.
2. Гладышев Ю.А., Калманович В.В. // В сб. «Прикладные задачи математики: материалы XXIII международной научно-технической конференции», Севастоп. гос. ун-т, Севастополь, 2015, с. 106-110.

О МОДИФИКАЦИИ МОДЕЛИ ДИФфуЗИИ НЕОСНОВНЫХ  
НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА, ГЕНЕРИРОВАННЫХ В  
МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛАНАРНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ  
СТРУКТУРЕ ШИРОКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ,  
ОСНОВАННОЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕКУРСИВНЫХ  
ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Е.В. Серегина<sup>1)</sup>, М.А. Степович<sup>2)</sup>, Аунг Мье<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калуга, Россия

<sup>2)</sup>ФГБОУ ВО «Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского», Калуга, Россия

В работе /1/ были проведены расчеты для модели диффузии неосновных носителей заряда, генерированных широким электронным пучком в двухслойном планарном полупроводниковом материале. Для решения дифференциального уравнения диффузии были использованы тригонометрические выражения в виде рекурсивных функций /2/. В настоящей работе проведено обобщение этого метода для случая многослойного полупроводникового материала. Модельные расчёты выполнены для параметров мишеней, характерных для материалов полупроводниковой микро- и нанoeлектроники.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-03-00515), а также РФФИ и правительства Калужской области (проект № 18-41-400001).

ЛИТЕРАТУРА

1. Серегина Е.В., Степович М.А., Макаренков А.М., Филиппов М.Н., Платошин Е.В. // Прикладная физика, 2015, № 1, С. 5.
2. Алюков С.В. // Математическое моделирование, 2011, Т. 23, № 3, С. 75.

ОЦЕНКА НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ОДНОРОДНОЙ  
МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫМ  
ЭЛЕКТРОННЫМ ЗОНДОМ

А.Н. Амрастанов<sup>1)</sup>, Е.В. Серегина<sup>2)</sup>, М.А. Степович<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>ФГБОУ ВО «Калужский государственный университет  
им. К.Э. Циолковского», Калуга, Россия

<sup>2)</sup>Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный  
технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)», Калуга, Россия

При использовании электронно-зондовых технологий для анализа и диагностики нанообъектов характерный размер микрообласти образца, из которой выходит большая часть информативного сигнала (вторичная электронная эмиссия, рентгеновский и другие сигналы), должен иметь размер меньший, чем характерные размеры анализируемого микрообъёма. Это возможно при существенном снижении энергии электронов – примерно до 2,5-5 кэВ. Однако при этом происходит существенное увеличение объемной плотности тепла, выделяемого в образце, что в некоторых случаях для изучаемых материалов и структур нежелательно, хотя возможно и обратное.

В настоящей работе методами математического моделирования проведено изучение нагрева поверхности однородной металлической мишени низкоэнергетичным электронным зондом. При расчётах потерь энергии электронами зонда в мишени использована модель, основанная на возможности раздельного количественного описания вклада поглощенных в мишени и обратно рассеянных электронов. Модельные расчёты проведены для широкого диапазона металлических материалов.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-03-00515), а также РФФИ и правительства Калужской области (проект № 18-41-400001).

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ  
СЛОЕВ CdTe ИОНАМИ  $Va^+$ 

Ё.С. Эргашов, Б.Е. Умирзаков  
Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан

В последние годы для получения наноразмерных структур в различных глубинах полупроводников широко используются методы ионной имплантации и СВЧ-облучения. Эти структуры имеют большие перспективы при создании новых приборов микро-, нано- и оптоэлектроники. В частности, гетероструктуры на основе CdTe могут быть использованы в качестве эффективных детекторов излучения в широком частотном диапазоне, включая солнечный.

Для получения наноразмерных фаз и нанослоев в приповерхностной области CdTe имплантация ионов  $Va^+$  проводилась с энергией  $E_0 \geq 10$  кэВ. В процессе ионной имплантации бинарных материалов происходит разложение их на составляющие, внедрение легирующей примеси и разупорядочения приповерхностных слоев. Наибольшее изменение наблюдается на глубине материала, соответствующей максимуму распределения имплантированных ионов. В случае CdTe, имплантированного ионами  $Va^+$  с  $E_0 = 15$  кэВ максимум распределения  $Va$  наблюдается на глубине 8-10 нм. При низких дозах ионов ( $D \leq 10^{15}$  см<sup>-2</sup>) эти процессы происходят в отдельных участках CdTe. С ростом дозы ионов размеры этих участков увеличиваются и, начиная с  $D = 10^{16}$  см<sup>-2</sup>, происходит перекрытие их границ, следовательно формируется сплошной ионно-имплантированный слой. При низких дозах ионов после разложения часть атомов Te и Cd вновь образует соединение Cd+Te, а другая часть атомов Te образует соединения типа Te<sub>2</sub>, а Cd диффундируется к поверхности.

Таким образом, впервые изучены изменения состава, структуры и электронные свойства поверхности и приповерхностных слоев CdTe при имплантации ионами  $Va^+$  с  $E_0 > 10$  кэВ. Показано, что ионно-легированные слои имеют очень сложный, изменяющейся по глубине, составу и обладает свойствами узкозонного полупроводника.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕСЬСОДЕРЖАЩЕГО КРЕМНИЯ ПРИ  
БОМБАРДИРОВКЕ ТЯЖЕЛЫМИ КЛАСТЕРНЫМИ ИОНАМИ  
 $Au_m$

Ш.Д. Ахунов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий  
АН РУз, Ташкент, Узбекистан,

Применение кластерных бомбардирующих ионов существенно неаддитивно увеличивает выход вторичных ионов, особенно кластерных и молекулярных, в том числе примесьсодержащих в случае SIMS кремния [1-2]. Максимальный эффект получен при использовании тяжелых кластерных ионов  $Au_m$  ( $m=3,5$ ), а для органических материалов также ионов фуллеренов  $C_{60}$ .

В данной работе проведены результаты исследования зависимости выхода вторичных атомарных и молекулярных ионов от количества составляющих атомов и энергии бомбардирующих кластерных ионов  $Au_m$  при распылении примесьсодержащего монокристалла кремния. При сравнении спектров вторичных ионов в режиме равных энергий на атом бомбардирующих ионов  $E_0/m=6$  кэВ наблюдалось существенное неаддитивное усиление выхода вторичных кластерных ионов  $Si_m^+$  с ростом количества атомов в кластерных бомбардирующих ионах.

Исследована зависимость выхода примесьсодержащих молекулярных ионов  $Si_nX^+$ . Наиболее подходящими для анализа примесей вторичными молекулярными ионами являются гетероатомные ионы, имеющие квазиполные внешние электронные оболочки, содержащие например, в сумме бр-электронов. При этом наблюдается наиболее высокая степень ионизации приотрыве от поверхности. Ярким примером служит молекулярный ион  $Si_2N$  имеющий один из наиболее интенсивных выходов в масс-спектре кремния.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Jacquet D., Le Beyec Y., Nucl. Instr. and Meth. B 193 (2002) 227
2. Van Stipdonk M.J. in: John C. Vickerman, David Briggs (Eds.). TOF-SIMS: Surface Analysis by Mass Spectrometry, IM Publication and Surface Spectra, Huddersfield, 2001. p. 309

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТЕРМОДЕСОРБЦИИ И ГЕТЕРОГЕННОЙ РЕАКЦИИ  
ДИССОЦИАЦИИ МОЛЕКУЛ МОРФИНА И ТЕБАИНА НА  
ПОВЕРХНОСТИ ОКИСЛЕННОГО ВОЛЬФРАМА.

Г.Т. Рахманов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз,  
Ташкент, Узбекистан

Нестационарные методы поверхностной ионизации (ПВИ) – метод модуляции напряжения и потока позволяют определять кинетические характеристики взаимодействия атомных и молекулярных частиц с поверхностью твердого тела [1;2].

Адсорбция и поверхностная ионизация молекул морфина и тебаина на поверхности окисленного вольфрама исследовано термическими методами нестационарных процессов. Определены константы скоростей и энергии активации термодесорбции молекул по (С-С) связи с образованием ионизируемых радикалов в виде нейтральных частиц, а также характеристическое время жизни частиц и энергии активации гетерогенной реакции диссоциации молекул на поверхности. Приведены результаты исследования молекул с образованием радикалов  $C_3H_7NCH_3$  с  $m/z = 144$  и  $C_{11}P_{12}OH$  с  $m/z = 174$  в виде положительных ионов и нейтралов на поверхности окисленного вольфрама.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаров Э.Г., Расулев У.Х. Нестационарные процессы поверхностной ионизации. Ташкент, Фан, 1991, с.204.
2. Rakhmanov G.T., Rasulev U.H., Saidumarov I.M. Surface and analysis, Vol. 38, 2006, P.219-223

## ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТОМОВ АЗОТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ КРИСТАЛЛА АЛЮМИНИЯ

В.С. Малышевский, Г.В. Фомин, Е.В. Дергачева,

Т.И. Жилина

Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Методом компьютерного моделирования исследованы особенности угловых распределений ускоренных нейтральных атомов азота при скользящих углах падения на поверхность кристалла Al (001). Для парного потенциала взаимодействия N-Al выбрана трехпараметрическая аппроксимация Морзе с зависящими от энергии коэффициентами.

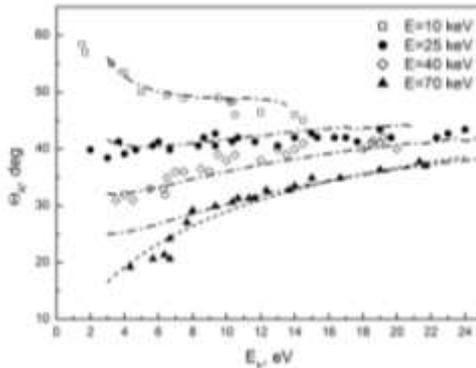


Рис.1. Зависимость радужного угла рассеяния нейтральных атомов азота от значения поперечной энергии при падении на поверхность (001) кристалла Al вдоль осевого направления  $\langle 100 \rangle$ . Символы - экспериментальные данные [1], стрихпунктирные линии - результаты моделирования.

Определены параметры парного потенциала ускоренных нейтральных атомов азота в диапазоне энергий от 10 до 70 кэВ по наилучшему согласию расчетной зависимости радужного угла рассеяния от энергии падающих на поверхность кристалла частиц с имеющимися экспериментальными данными [1].

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. A. Schuller, H. Winter//Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res., 2009, **B267**, 628.

## МОДИФИКАЦИЯ ГРАФЕНА ИОННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ

Д.К. Миннебаев<sup>1)</sup>, А.А. Шемухин<sup>1)</sup>, Ю.В. Балакшин<sup>1)</sup>, А.В. Назаров<sup>1)</sup> К.А. Букунов<sup>1)</sup>, И.Д. Харитонов<sup>2)</sup>, С.Н. Калмыков<sup>2)</sup>  
А.Д. Заболотский<sup>3)</sup>, Е.В. Зайцев<sup>4)</sup>

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

<sup>2)</sup> Химический факультет МГУ, Москва, Россия

<sup>3)</sup> ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автотоматики им. Н. Л. Духова», Москва, Россия

<sup>4)</sup> РХТУ им. Менделеева, Москва, Россия

Графен представляет собой углеродный материал толщиной в один атом. Множество свойств графена, таких как электропроводность, высокая подвижность носителя заряда, оптическая прозрачность, механическая прочность и низкая химическая активность являются многообещающими для различных приложений в электронике, оптике, а также материаловедении. Однако во многих практических приложениях требуется модификация параметров графена.

Графен на медной подложке был получен методом химического осаждения из газовой фазы. Модификация слоев была проведена с помощью пучка ионов гелия с энергией 30 – 100 кэВ при дозах от  $10^{12}$  ион/см<sup>2</sup> до  $5 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>. Эксперименты были проведены при различных температурах подложки. Плотность радиационно-индуцированных дефектов и их средний размер оценивались с помощью комбинационного рассеяния света, растровой электронной микроскопией и атомно-силовой микроскопией.

В работе обсуждается влияние параметров ионного облучения на генерацию дефектов в слое графена и поверхностных слоях меди, а также влияние на эти процессы температуры подложки

МОДЕЛИРОВАНИЕ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АТОМОВ,  
РАСПЫЛЁННЫХ ПУЧКОМ ГАЗОВЫХ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВА.В. Назаров<sup>1)</sup>, В.С. Черныш<sup>1)</sup><sup>1)</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Угловые распределения атомов, распылённых пучком газовых кластерных ионов, значительно отличаются от угловых распределений атомов, распылённых мономерами. Экспериментальные исследования, а также результаты компьютерного моделирования показывают, что распыление атомов под действием облучения пучком газовых кластерных ионов происходит преимущественно в латеральном направлении.

Однако, было экспериментально продемонстрировано [1], что для некоторых материалов мишени, таких как молибден, угловые распределения имеют ярко выраженный максимум в направлении нормали к поверхности образца. Для того, чтобы объяснить механизм формирования угловых распределений, отличных от латеральных, для некоторых материалов, было проведено моделирование распыления молибдена кластерными ионами аргона методом молекулярной динамики.

Было проведено две серии расчётов: в одной каждый кластер попадает в идеальный кристалл мишени, во второй – учитывается эволюция поверхности мишени под действием кластерного облучения, а также распределение кластеров по размерам совпадает с экспериментально измеренным распределением в пучке.

Приводятся полученные угловые распределения, также для выявления механизмов распыления анализируются энергетические распределения распылённых частиц.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00725.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. V. S. Chernysh, A. E. Ieshkin, and Y. A. Ermakov // Appl. Surf. Sci., 2015, 326, 285.

## ГЕНЕРАЦИЯ ЖЕСТКОГО ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СКОЛЬЗЯЩЕМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПУЧКА БЕТАТРОНА С ПОВЕРХНОСТЬЮ Та ФОЛЬГИ

М.М. Рычков, В.В. Каплин, С.И. Кузнецов, В.А. Смолянский,  
И.К. Васьковский

Национальный Исследовательский Томский Политехнический  
Университет, Томск, Россия

На установке, созданной на базе бетатрона Б-18 /1/, исследована генерация жесткого тормозного излучения при скользющем взаимодействии 18 МэВ электронов с поверхностью тонкой танталовой фольги. Для получения ориентационной зависимости генерированного излучения, Та фольга толщиной 13 мкм и длиной 2,5 мм была установлена в гониометре внутри камеры бетатрона вдоль пучка электронов. Результаты показали сильные изменения угловых распределений жесткого тормозного излучения с изменением ориентации мишени, что отсутствует при нормальном падении электронов на поверхность тонкой мишени.

В работе при использовании генерированного излучения получены увеличенные изображения микроструктурного эталона Duplex IQI и сложного объекта, составленного из 6 и 9 мм стальных плиток. Исследовалось участие абсорбционного и краевого фазового контрастов в формировании изображений проволочных структур эталона и плоских границ раздела сред в сложном объекте.

Качественные изображения реализуются за счет малого горизонтального размера источника излучения, который составляет 13 мкм для излучения, испускаемого “прямо – вперед”, и увеличивается при увеличении угла эмиссии излучения из мишени.

Исследования поддержаны в рамках проекта Российского научного фонда, проект № 17-19-01217.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Rychkov, M.M., Kaplin, V.V., Kuznetsov, S.I., Suharnikov, K.V., Vaskovsky, I.K. // *Journal of Surface Investigation*. 2017. 11, 3, p. 660-663.

## ЭМИССИЯ И ФРАГМЕНТАЦИЯ КЛАСТЕРОВ $\text{Si}_n\text{O}_m^-$ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКИ

С.Е. Максимов<sup>1,2</sup>, Н.Х. Джемилев<sup>1</sup>, С.Ф. Коваленко<sup>1</sup>,  
О.Ф. Тукфатуллин<sup>1</sup>, Ж.Т. Азимов<sup>2</sup>, Ш.Т. Хожиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им.

У.А. Арифова АН РУз, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Институт химии и физики полимеров Академии Наук Республики  
Узбекистан, Ташкент, Узбекистан.

Исследования зависимости интенсивностей эмиссии и мономолекулярного распада распыленных кластеров  $\text{Si}_n\text{O}_m^-$  от давления кислорода вблизи бомбардируемой поверхности исследованы методом вторично-ионной масс-спектрометрии по методике /1,2/ при распылении поверхности кремния ионами  $\text{Xe}^+$  с энергией 17,5 кэВ. Показано, что при низких давлениях  $\text{O}_2$  преобладают выходы ионов с малым или примерно равным отношением  $m$  к  $n$ , тогда как при больших давлениях наибольшую интенсивность имеют кластеры  $\text{Si}_n\text{O}_m^-$  с  $m=2n$  и  $m=2n+1$  в соответствии с /1/. Во временных диапазонах  $\sim 10^{-6}$ - $10^{-5}$ с и  $\sim 10^{-5}$ - $10^{-4}$ с после эмиссии проведены сравнительные исследования изменения выходов «стабильных» кластеров  $\text{Si}_n\text{O}_m^-$  и их фрагментных ионов. На основании полученных данных сделан вывод, что с учётом взаимной обратимости реакций образования и мономолекулярной фрагментации распыленных кластеров, процесс образования  $\text{Si}_n\text{O}_m^-$  с  $n \leq 2n$ , аналогично «магическим» кластерам  $\text{Si}_n\text{O}_{2n+1}$  /1/, может быть описан в рамках механизма комбинаторного синтеза /1/. В соответствии с данным механизмом, кластеры  $\text{Si}_n\text{O}_m^-$  формируются в нескольких одновременно и параллельно идущих каналах цепных реакций при рекомбинации над поверхностью распыленных ионов, атомов и молекул путём последовательного присоединения нейтральных мономеров к активным ионам в результате парных столкновений при их различных сочетаниях между собой.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Джемилев Н.Х. //Поверхность, 2012, №8, С.28-34.
2. Джемилев Н.Х., Коваленко С.Ф., Максимов С.Е. и др. //Поверхность, 2017, №5, С.10-16.

## ЭВОЛЮЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТОДОВ В ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ

А.И. Кудюкин<sup>1)</sup>, М.Н. Махмудов<sup>1)</sup>, Е.Н. Моос<sup>1)</sup>,  
В.А. Степанов<sup>1)</sup>, К.С. Серёгин<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,  
Рязань, Россия

В работе представлены результаты исследования эволюции поверхности катодов в газовом разряде He-Ne лазеров и изменений морфологии и состава двухкомпонентных электродов при развитии вакуумного дугового разряда.

Изучение этих процессов требует применения комплекса методов микронзондового анализа: рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, электронного сканирующего микронзондового анализа (в послыоного и растровом режиме), а также атомно-силовой микроскопии.

При послыоном анализе поверхности катода He-Ne лазера, легированного примесями магния и железа, обнаружен выраженный поверхностный слой углерода, аналитический сигнал которого убывает до фонового значения по глубине (Рис.1).

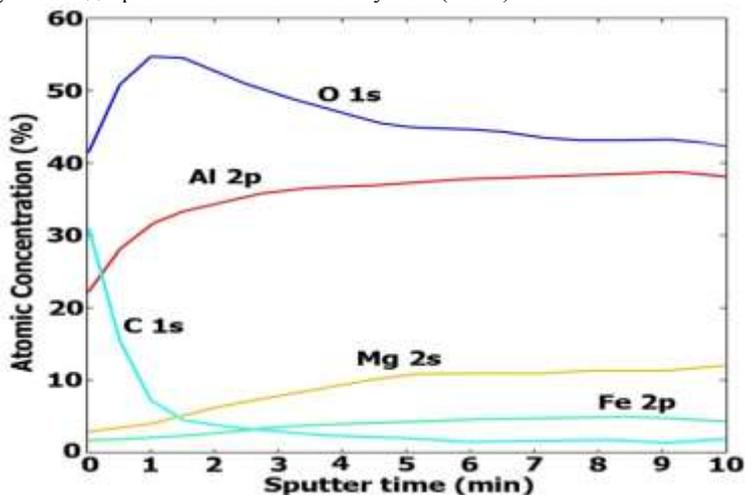


Рис.1. Распределение атомов по глубине

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОПЛЕНОК  
NiSi<sub>2</sub>/Si

Д.А. Ташмухамедова, Ж.Ш. Содикжонов, Н. Мустафоева, А.К.  
Ташатов, Б.Е. Умирзаков  
Ташкентский государственный технический университет, Ташкент,  
Узбекистан

В работе исследованы основные физические свойства наноразмерных структур NiSi<sub>2</sub> созданных на поверхности Si методом низкоэнергетической ионной имплантации. Перед ионной имплантацией кремниевые образцы очищались прогревом при вакууме  $P = 10^{-7}$  Па. Имплантация ионов Ni проводилась с энергией  $E_0 = 1 - 5$  кэВ при дозе насыщения ( $D = (6 - 8) \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>).

В таблице приведены некоторые физические параметры Si и пленки NiSi<sub>2</sub>/Si с толщиной  $d = 30$  и  $60$  Å.  $\varphi$  и  $\Phi$  – термо- и фотоэлектронная работа выхода,  $E_g$  – ширина запрещенной зоны,  $\chi$  – сродство к электрону,  $\sigma_m$  – максимальное значение коэффициента ВЭЭ,  $Y$  – квантовый выход фотоэлектронов,  $\rho$  – удельное сопротивление. Для сравнения там же приведены параметры для толстой пленки NiSi<sub>2</sub> с толщиной  $500$  Å, полученной методом твердофазной эпитаксии.

Зонно-энергетические, эмиссионные и оптические параметры Si  
(111) и пленки NiSi<sub>2</sub>/Si (111)

Образец	d, Å	$\varphi$ , эВ	$\Phi$ , эВ	$E_g$ , эВ	$\chi$ , эВ	$\sigma_m$	Y	$\rho$ , мкОм ·см
Si (111)	0	4,7	5,1	1,1	4	1,1	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^6$
NiSi <sub>2</sub> /Si (111)	30	4,3	4	0,5	3,5	1,5	$4 \cdot 10^{-4}$	80
	60	–	4	0,5	3,5	1,6	$4 \cdot 10^{-4}$	60

Из таблицы видно, что ширина запрещенной зоны NiSi<sub>2</sub> при  $d = 30$  Å и составляет  $0,6$  эВ и обладает свойствами близкими к металлам ( $\rho = 100$  мкОм·см). При этом значение  $\sigma_m$  и Y увеличивается до 1,5 и 2 раза. По-видимому, эмиссионная эффективность слоев NiSi<sub>2</sub> немного больше, чем эффективности слоев Si, что может быть связано с заметным отличием атомной плотности NiSi<sub>2</sub> ( $\sim 4,5$  г/см<sup>3</sup>) от плотности Si ( $2,42$  г/см<sup>3</sup>). Электронные и оптические свойства пленок NiSi<sub>2</sub> с  $d = 60$  Å практически не отличались существенно не отличались от таковых для толстой пленки.

## ПРИЧИНЫ НЕВОСПРОИЗВОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАСПЫЛЕНИЯ

А.Н. Пустовит

ИПТМ РАН, Черноголовка, Московская область, Россия

Известно, что перед проведением измерений экспериментальных данных при распылении необходимо подготовить соответствующим образом распыляемую поверхность мишени /1/. Простые способы первоначальной подготовки поверхности образцов (прогрев и незначительная начальная очистка ионным пучком) не устраняют значительный разброс экспериментальных измерений /1-3/. Основной причиной этого принято считать наличие на исходной поверхности мишеней окисного слоя. В данной работе главной причиной невоспроизводимости результатов измерений на начальной стадии распыления считается изменение состава приповерхностного слоя образца за счет имплантации первичных ионов /4/. В процессе распыления происходит постепенное накопление атомов первичного пучка в области нескольких нанометров от поверхности мишени, достигающего в стационарном режиме ~ 20 - 40 % состава распыляемого вещества /4/.

Обсуждаются возможные подходы для учета влияния изменения состава приповерхностного слоя в процессе распыления.

### ЛИТЕРАТУРА

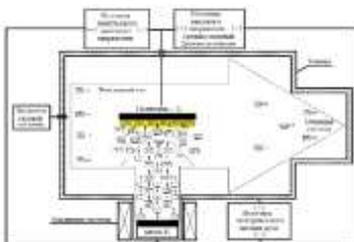
1. Векслер В.И. Вторичная ионная эмиссия металлов. М.: Наука, 1978, 240 с.
2. Черепин В.Т. Ионный зонд. Киев: Наук.думка, 1981, 328 с.
3. Машкова Е.С., Молчанов В.А., Фаязов И.М., Экштайн В. // Поверхность. 1994. № 2. С.33.
4. Пустовит А.Н.// Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2013. № 2. С. 78.

## СИНТЕЗ ВЕЩЕСТВА ПРИ ВАКУУМНО- ДУГОВОЙ КОНДЕНСАЦИИ В УЛОВИЯХ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКИ

В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуоров, И.Х. Худойкулов,  
Б.Р. Кахрамонов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АН им. Ари-  
фова У.А. РУз, Ташкент, Узбекистан;

Процесс осаждения покрытия из плазмы вакуумного дугового разряда совмещается с очисткой и активацией плазмой катодных пятен, в одном технологическом цикле, что обеспечивает достижение высоких параметров наносимого защитного покрытия и прежде всего адгезии к основе. На схеме представлена вся совокупность технических систем и воздействий в рамках которых осуществляется процесс синтеза осаждаемого материала при ионно-плазменном осаждении покрытий в условиях ионной бомбардировки в реактивном газе - инверторных источников электрического



питания вакуумного дугового разряда с мощностью 10кВт ток до 500А, - инверторного источника питания для реализации процесса ионно-плазменной очистки и нагрева обрабатываемой поверхности изделия до 5 кВт, с плавной регулировкой напряжения от 50 до 1000 В;- импульсного

высокочастотного источника питания для реализации процесса ионно-плазменного нанесения покрытий в режиме иммерсионного осаждения до 5 кВт, с плавной регулировкой напряжения от 50 до 1500В, частотой 30кГц. Напряжение на образце в режиме активации составляло 1000В при токе разряда 80А, длительность обработки 8-10 минут до достижения изделием температуры 300-350°C. На рисунке представлен процесс генерации плазменного потока с торцевой поверхности дугового источника плазмы.



## ХАРАКТЕР ВОЗДЕЙСТВИЯ КАТОДНОЙ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОЙ ДУГИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х. Худойкулов,  
Б.Р. Кахрамонов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН  
им. У.А. Арифова РУз, Ташкент, Узбекистан;

Удаление материала с поверхности металлического изделия при воздействии катодной плазмы вакуумной дуги осуществляется катодными пятнами разряда, число которых возрастает с ростом тока дуги. При этом площадь, на которую воздействуют катодные пятна может быть определена как  $S = nvd$ , где  $n$  - число катодных пятен,  $v$  - их скорость, а  $d$  - диаметр катодного пятна. Ток на одно пятно порядка 10-15 А. Соответственно площадь обработки плазмой вакуумной дуги порядка 100- 200 см<sup>2</sup>/с. Более высокое значение тока 200-220А нужно для очистки поверхности с большей плотностью и толщиной окисленной пленки. При токе дуги 180А процент очистки внутренней поверхности трубы достигает 100%, хотя сферическая и плоская поверхности очищаются от окалины полностью уже при токе 125А. Следы эрозии появляются только при токе дуги 180-200А. Характерная величина микронеровностей от следов катодных пятен на очищенной поверхности не превышает 2,9 мкм. Отдельно следы эрозии, не увеличивающие исходную шероховатость поверхности, появляются только при токе дуги 180-200А. Катодные пятна вакуумной дуги преимущественно задерживаются у загрязнений, окалины. При этом скорость катодных пятен на чистой металлической поверхности выше, чем на покрытой окалиной поэтому двукратная обработка изделия при неочищенной первым проходом обычно не приводит к полной очистке поверхности. В то время как однократная обработка поверхности суммарным током полностью удаляет с поверхности окалину. Многократная обработка приводит к съему металла и утончению образца. Скорость съема составляет для стали 45 1,8 г/мин. при токе разряда 190-220А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ  
ИОНОМ ОБЛУЧЕНИИ НАНОТРУБОКА.В. Степанов<sup>1)</sup>, А.А. Шемухин<sup>2)</sup> Б. Мерзук<sup>2)</sup> С.В. Бурикова<sup>2)</sup><sup>1)</sup> ЧГСХА, Чебоксары, Россия<sup>2)</sup> МГУ им М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Для расчетов использовался код LAMMPS /1/ и потенциал AIREBO /2/ для описания взаимодействия атомов углерода между собой. Для описания взаимодействия  $\text{Ag}^+$ -C использовался потенциал Ziegler-Littmark-Biersack (ZBL).

Для моделирования ионного облучения многостенной углеродной нанотрубки (МСУНТ) была применена следующая модель. Нанотрубка содержащая 14 слоев (самый малый (10,10) – диаметр 1.4 нм, самый большой – (75,75) – диаметр 10 нм, слои ориентировались друг относительно друга, так, чтобы удовлетворить упаковке графита АВАВ) помещалась в ячейку размерами  $30 \times 30 \times 30$  нм. Трубка изначально находилась при температуре 0 К. Ион  $\text{Ag}^+$  с энергией 80 кэВ стартовал с расстояния 5.5 нм от плоскости, содержащей ось нанотрубки. После пролета каждого иона нанотрубка подвергалась термостатированию (нагрев, а затем охлаждение), после чего запускался следующий ион.

После пролета иона в среднем выбивалось от 10 до 17 атомов углерода. Дальнейшее разупорядочение атомов углерода в МСУНТ происходило из-за нагрева нанотрубки, вызванного облучением.

Исследование проведено при поддержке грантов президента (грант SP-4870.2018.1). Расчеты проведены с использованием суперкомпьютера Ломоносов /3/

## ЛИТЕРАТУРА

1. Plimpton, S. // Journal of Computational Physics, 1995, 117(1): p. 1.
2. Stuart, S.J., A.B. Tutein, and J.A. Harrison // The Journal of Chemical Physics, 2000, 112(14), p. 6472.
3. Sadovnichy V., Tikhonravov A., Voevodin V.I., et al., Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale, Boca Raton, CRC Press, 2013, 283 p.

## ENHANCEMENT OF CNT-BASED FILTERS BY He ION IRRADIATION

Emad.M. Elsehly<sup>1),2)</sup>, N.G. Chechenin<sup>1)</sup>, A.V. Makunin<sup>1)</sup>, H.A. Motaweh<sup>2)</sup>,  
A. A. Shemukhin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> SINP MSU, Russia,

<sup>2)</sup> Damanhour University, Egypt

Recent experiments on ion irradiation of carbon nanotubes have revealed a wealth of intriguing phenomena. However, in spite of the experimental progress, the production of irradiation-induced defects in multiwalled carbon nanotubes (MWNTs) and their properties are not yet well understood. It is shown in the report that disorder produced by ion beam irradiation can enhance the functionality of the carbon nanotubes. The filters of pressed multiwalled carbon nanotubes (MWNTs) were irradiated by He<sup>+</sup> ions of the energy E=80 keV with the fluence  $2 \times 10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup>. The removal of manganese from aqueous solutions by using pristine and ion beam irradiated MWNTs filters was studied as a function of pH, initial concentration of manganese in aqueous solution, MWNT mass and contact time. The filters before and after filtration were characterized by Raman (RS) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) techniques to investigate the deposition content in the filter and defect formation in the MWNTs. The irradiated samples showed an enhancement of removal efficiency of manganese up to 97.5% for 10 ppm Mn concentration, suggesting that irradiated MWNT filter is a better Mn adsorbent from aqueous solutions than the pristine one. Radiation-induced chemical functionalization of MWNTs due to ion beam irradiation, suggesting that complexation between the irradiated MWNTs and manganese ions is another mechanism. This conclusion is supported by EDS and RS and is correlated with a larger disorder in the irradiated samples as follows from RS. The study demonstrates that ion beam irradiation is a promising tool to enhance the filtration efficiency of MWNT filters.

The work is supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (grants # 14-02-01230a). E. Elsehly is thankful for the financial support from the Ministry of High Education (missions sector) in Egypt.

## REFERENCES

1. Emad.M. Elsehly, et al. Morphological and structural modifications of multiwalled carbon nanotubes by electron beam irradiation, *Material research express*, 2016, Vol. 3, 105013.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОЙ  
СПЕКТРОСКОПИИ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
ГРАФЕНА ИЗ ОКСИДА ГРАФЕНА

В.П. Афанасьев<sup>1)</sup>, Г.С. Бочаров<sup>1)</sup>, А.С. Грязев<sup>1),2)</sup>,  
А.В. Елецкий<sup>1)</sup>, П.С. Капля, О.Ю. Ридзель<sup>1),3)</sup>

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

<sup>2)</sup>АО «ВНИИНМ», Москва, Россия

<sup>3)</sup>TU Wien, Vienna, Austria

Графен обладает уникальными физико-химическими характеристиками, что открывает широкие возможности для использования этого материала в электронике, электрохимии, солнечной энергетике и других высокотехнологических областях.

В качестве исходного материала использовался оксид графена, полученный методом Хаммерса /1/. Образцы подвергались термообработке в атмосфере аргона в высокотемпературной печи при  $T_0$  от комнатной до 1000 °С.

Проведен анализ химических соединений в исследуемых образцах исследование по 1s пику углерода. В работе внимание сосредоточено на определении дифференциальных сечений неупругого рассеяния  $x_{in}(\Delta)$  фотоэлектронов в исследуемых образцах, т.к. существует взаимно однозначное соответствие между видом  $x_{in}(\Delta)$  и аллотропной разновидностью углерода (например, /2/).

Интересен факт появления характерного для графена  $\pi$ -плазмонного пика, в спектрах образцов с  $T_0 > 200$  °С. Образцы с  $T_0 > 600$  °С обладали стабильными  $x_{in}(\Delta)$  характерными для пиролизического графита, но их плотность в 2-3 раза меньше плотности графита. Спектры комбинационного рассеяния от указанных образцов и от графита резко отличаются, что позволяет определить характерные размеры полученной пористой структуры.

Работа была выполнена в рамках государственного задания № 3.1414.2017.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hummers W.S., Offeman R.E. // Journal of the American Chemical Society, 1958, v. 80, p. 1339.
2. Pauli N., Novak M., Tougaard S. // Surface and Interface Analysis, 2013, v. 45, p. 811.

ЭФФЕКТЫ БЛИСТЕРИНГА И ФЛЕКИНГА  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ  $Ti_xCr_{1-x}N$  ПРИ  
ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

Ф.Ф. Комаров<sup>1)</sup>, С.В. Константинов<sup>1)</sup>, В.Е. Стрельницкий<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко»  
Белорусского государственного университета,  
Минск, Белоруссия

<sup>2)</sup> Национальный научный центр  
Харьковский физико-технический институт,  
Харьков, Украина

Впервые проведено исследование радиационной стойкости нано структурированных покрытий  $Ti_xCr_{1-x}N$   $0,58 \leq x \leq 0,8$  при облучении ионами  $He^+$  с энергией 500 кэВ в диапазоне флюенсов  $5 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> –  $3 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Установлено, что покрытия  $Ti_xCr_{1-x}N$   $0,8 \leq x \leq 0,58$  выдерживают облучение без существенных изменений структуры до флюенса  $2 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>, при котором происходит частичный флекинг (отшелушивание) покрытий до глубины среднего проективного пробега ионов гелия (рис. 1). Обнаружено уменьшение среднего размера кристаллитов покрытий и уменьшение периода кристаллической решетки покрытий после облучения.

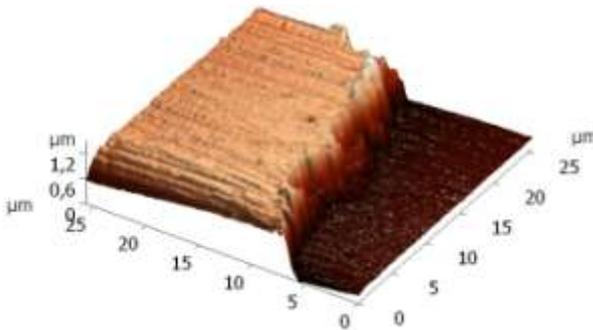


Рис. 1 Морфология скола на поверхности покрытия  $Ti_xCr_{1-x}N$ ,  $x=0,80$  после облучения ионами  $He^+$ , флюенс  $2 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> и отжига при 500 °С в течение 15 мин



**Секция III**

**ФИЗИКА ПРОХОЖДЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО (МНОГОКРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ,  
ОРИЕНТАЦИОННЫЕ И РЕЛЯТИВИСТСКИЕ  
ЭФФЕКТЫ, ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, ИЗМЕНЕНИЕ  
ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ ЧАСТИЦ, ИЗЛУЧЕНИЕ  
ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ И Т.П., ГЕНЕРАЦИЯ  
ИЗЛУЧЕНИЙ)**



ВЫЧИТАНИЕ ФОНА РФЭС С УЧЕТОМ МНОГОКРАТНОГО  
НЕУПРУГОГО РАССЕЙНИЯ ФОТОЭЛЕКТРОНОВ В ОБЪЕМЕ И  
НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

А. В. Лубенченко, Д. А. Иванов, О. И. Лубенченко,  
И. В. Шуркаева  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
111250 Москва, Россия

Для вычитания фона в рентгеновских фотоэлектронных спектров (РФЭС) в основном применяются методы Ширли (Shirley) [1] и Тоугорда (Tougaard) [2]. Эти методы дают достаточно простые расчётные алгоритмы. Метод Ширли – чисто математический, он не учитывает особенности неупругого рассеяния электронов в твёрдом теле. Метод Тоугорда следует из приближённого решения задачи многократного неупругого рассеяния электронов в твёрдом теле в предположении о независимости дифференциального неупругого сечения рассеяния электронов по глубине. Однако, для неупругого рассеяния мишень всегда неоднородная. Потери энергии электронов в поверхностных слоях и массиве мишени идут по различным законам. Неучёт этого приводит к тому, что точность вычисления фона по методам Ширли и Тоугорда непредсказуема.

В работе предложен новый метод вычитания фона РФЭС, учитывающий многократное неупругое рассеяние фотоэлектронов как в объёме твёрдого тела, так и на его поверхности. На поверхности мишени потери энергии фотоэлектронов определяются потерями на возбуждение поверхностных плазмонов, а в глубине мишени потери на возбуждение объёмных плазмонов и ионизационные потери. В работе приведены результаты расчетов фона для различных фотоэлектронных линий РФЭС, как однородных, так и неоднородных мишеней. Показано сравнение и точность вычисления фона по различным методам.

1. Shirley D. A. // Phys. Rev. 1972. V.B5, 12 P. 4709.
2. Tougaard S. // Surf. Sci. Lett. 1989. V. 216, 3. P. A330

NON-DIPOLE FEATURES IN THE PHOTON EMISSION  
SPECTRUM OF THE FAST-ORIENTED LEPTON IN THE  
CRYSTAL

N.P. Kalashnikov<sup>1)</sup>, E.A. Mazur<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>National Research Nuclear University "MEPHI", Kashirskoe sh.31,  
Moscow, 115409, Russia

<sup>2)</sup>National Research Center «Kurchatov institute», 1,  
Akademika Kurchatova pl., Moscow, 123182, Russia

The processes of the photon generation by the quantum crystal-oriented particle entering into the crystal at angles both greater and smaller than the Lindhard angle are considered. The probability of the photon excitation by the quantum above-barrier channeled particle is calculated. It is shown the predominant role of the matrix elements of the second-type for the transition between the quantum levels of the transverse motion of the CP. The above-barrier and sub-barrier transitions as well as quantum bands of the above-barrier and sub-barrier channeled particle have been considered on an equal footing. The parametric dependence of the band properties of channeled particle on the particle energy is fully taken into account. The probability of the nondipole photon radiation by the channeled particle with the energy  $E = 10 \text{ GeV}$  within a solid angle  $3,6 \times 10^{-16} \text{ sr}$  oriented along the propagation direction of the channeling particle is shown to be equal to  $w_{if}(\omega_{if}) = 0,2 \text{ s}^{-1}$ . When extending the solid angle within which the measurements are made, the probability of the photon emission increases significantly. Such an increase in the probability is associated with the fact that at large angles of observation the predominant contribution to the probability of the photon radiation will bring the transition matrix elements of the second type  $|I_{if}^{(2)}(k_x)|^2$  which are much larger in magnitude than the matrix elements of the first type  $|I_{if}^{(1)}(k_x)|^2$ . It has been shown that the nondipole processes of the radiation of hard photons by the channeled particles are well observed experimentally.

«ТОНКОЕ» РАСЩЕПЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ В  
РЕЗУЛЬТАТЕ СПИН-ОРБИТАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
КАНАЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ.

Н.П. Калашников, А.С. Ольчак

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, Россия

Аксиально каналированный электрон в сопутствующей системе координат, движущейся со скоростью, равной проекции скорости электрона на ось каналирования (ССК), можно рассматривать как двумерный одноэлектронный атом, обладающий дискретным спектром энергии и момента импульса, определяющего также и орбитальный магнитный момент, создаваемый каналированным электроном. В результате спин-орбитального взаимодействия происходит «тонкое» расщепление энергетических уровней поперечного движения каналированных электронов. В статье оценивается величина соответствующего энергетического расщепления. Если дополнительно подвергнуть каналированные электроны воздействию лазерного излучения, то при совпадении (в ССК) частоты внешнего периодического воздействия (оптического фотона) с энергией перехода каналированной частицы из одного квантованного состояния поперечного движения в другое, то возможно резонансное поглощение фотонов лазерного пучка и их последующее переизлучение с увеличенной частотой (в силу эффекта Доплера). В статье обсуждаются условия достижения соответствующего резонансного эффекта.

## ОСОБЕННОСТИ ЗАРЯДОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЫСТРЫХ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Н.В. Новиков, Я.А. Теплова  
НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

В современных теоретических моделях зарядовое и энергетическое распределения ионов, проходящих через мишень, описываются независимо друг от друга. Считается, что при определенной толщине мишени распределение ионов по заряду  $q$  в пучке установилось, а средний заряд ионов равен  $\bar{q}$ . Потери энергии ионов вычисляются в предположении, что все ионы в пучке имеют одинаковый заряд  $q = \bar{q}$ . В такой модели ионы с разными зарядами  $q$  при прохождении мишени теряют одинаковую энергию.

Экспериментальные данные [1–3] показали, что потери энергии ионов возрастают с увеличением их заряда. Поэтому даже при равновесном распределении по заряду надо учитывать различия в потерях энергии ионов с разными зарядами, которые приводят к разбросу в энергетическом распределении ионов за счет влияния неупругих ион - атомных столкновений. Следовательно, требуется уточнение традиционной теоретической модели для описания энергетического и зарядового распределения ионов в среде и разброса потерь энергии, вызванного процессами перезарядки. Особенно это важно, когда заряд падающего на мишень иона отличается от значения  $\bar{q}$ , и равновесное зарядовое распределение в поверхностных слоях мишени еще не установилось.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Cowern N.E.B. et al // Phys.Rev.A, 1984, V.30, P.1682.
2. Ogawa H. et al. // Phys.Rev.B, 1991, V.43, P.11370.
3. Blazevic A. et al // Phys.Rev.A, 2000, V.61, P.032901.

ДВУХПОТОКОВАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТА ЗАРЯЖЕННЫХ  
ЧАСТИЦ В КОНДЕНСИРОВАННОМ ВЕЩЕСТВЕ ПРИ  
МНОГОКРАТНОМ РАССЕЯНИИ: СРЕДНИЕ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ  
И ПРОБЕГ ПУЧКА МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ С  
ЭНЕРГИЕЙ 0.1 кэВ – 1.0 МэВ

Н.Н. Михеев

ЛКМ ИК РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотони-  
ка» РАН,

248640, г. Калуга., Россия

В работе представлены результаты использования двух-  
поточковой модели транспорта заряженных частиц в веществе  
работ /1-4/ для описания средних потерь энергии пучка моно-  
энергетических электронов, прошедших пленочную мишень  
известного состава и заданной толщины. Получена универ-  
сальная формула, описывающая зависимость пробега пучка  
электронов  $R_c$  от энергии. Представлены результаты расчетов  
пробегов электронов для широкого диапазона материалов: от  
бериллия до золота, и проведено сравнение рассчитываемых  
значений  $R_c$  с многочисленными результатами эксперимен-  
тальных измерений величины  $R_c$ . Показаны очевидные пре-  
имущества нового подхода при описании средних значений  
потерь энергии электронами и хорошее соответствие, дости-  
гаемое между расчетами по полученной формуле и экспери-  
ментальными данными  $R_c$ .

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Mikheev N.N., Stepovich M.A. // Materials Science and Engineer-  
ing. B, 1995. Vol. 32. №1-2. P. 11.
2. Михеев Н.Н. // Известия РАН, серия физическая, 2000. Т. 64.  
№11. С. 2137.
3. Михеев Н.Н., Степович М.А., Юдина С.Н. // Поверхность.  
Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.  
2009. №3. С. 53.
4. Михеев Н.Н., Колесник А.С // Поверхность. Рентгеновские,  
синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 12. С.88.

ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ С  
ЭНЕРГИЕЙ 50 ГэВ В СЛОЕ КРЕМНИЯ ТОЛЩИНОЙ ОТ 157 мкм  
ДО 10 мм

Р. М. Нажмудинов<sup>1,2</sup>, А. В. Шагин<sup>1,3</sup>, С. В. Трофименко<sup>3,4</sup>,  
А. С. Кубанкин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>БелГУ, г. Белгород, Россия;

<sup>2</sup>ФИАН им. П. Н. Лебедева, г. Москва, Россия; <sup>3</sup>ННЦ ХФТИ,  
г. Харьков, Украина;

<sup>4</sup>ХНУ им. В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина;

Проведены измерения ионизационных потерь энергии релятивистских протонов в кремнии. В качестве мишени использовался Si детектор Hamamatsu S3590-18 толщиной 300 мкм. Контроль напряжения питания и угла поворота детектора относительно оси пучка позволил осуществить плавное управление эффективной длиной пути протонов в кристалле детектора в диапазоне от 157 мкм до 10 мм. Выполнено сравнение измеренных спектров потерь энергии с результатами вычислений /1,2/. Представленные результаты включают в себя данные, полученные в ходе исследований ионизационных потерь, проводимых в ГНЦ ИФВЭ (г. Протвино, Россия) с 2016 г /3/.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. R.M. Nazhmudinov, A.S. Kubankin, A.V. Shchagin, N.F. Shul'ga, S.V. Trofymenko, G.I. Britvich, A.A. Durum, M.Yu. Kostin, V.A. Maisheev, Yu.A. Chesnokov, A.A. Yanovich // Nucl. Instr. Meth. (2017) B 391 pp. 69–72.
2. S. Hancock, F. James // Phys. Rev. (1983) A 28 pp.615–620.
3. R.M. Nazhmudinov, A.V. Shchagin, S.V. Trofymenko, A.S. Kubankin, N.F. Shul'ga, A.G. Afonin, G.I. Britvich, A.A. Durum, M.Yu. Kostin, V.A. Maisheev, V.I. Pitalev, Yu.A. Chesnokov, A.A. Yanovich. Ionization Loss of 50 GeV Protons in Silicon with thickness from 157 μm to 10 mm. XII International Symposium RREPS, September 18-22, 2017, Hamburg, Germany, Book of Abstracts, p.133.

## КОГЕРЕНТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА ОТ МИШЕНЕЙ С ЗАДАННЫМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ.

С.Ю. Гоголев<sup>1)</sup>, Г.А. Науменко<sup>1)</sup>, А.П. Потылицын<sup>1)</sup>, К.В. Фёдоров<sup>1,2)</sup>, С.Г. Стучебров<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup> Ускорительный институт имени Джона Адамса, Лондон, Англия

В работе /1/ для измерения длины электронного густка использовалось когерентное излучение Вавилова-Черенкова (КИВЧ). В силу того, что материалы, используемые для генерации КИВЧ, имеют показатель преломления  $n > 1.4$ , вывод излучения из мишени простой геометрии невозможен. В работе /2/ было предложено использовать мишень простейшей геометрии (параллелепипед) изготовленную по технологиям 3-D печати с  $n < 1.4$ .

В работе представлены результаты моделирования спектрально-угловых характеристик КИВЧ на основе модели /3/ от прямоугольной мишени (100x100x40 мм) с показателем преломления  $n=1.32$  в диапазоне длин волн  $\lambda=5\div 30$  мм для электронов с энергией 6 МэВ и показано удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.

Показано, что при прохождении густка в вакууме вблизи мишени на расстояниях  $h < \gamma \lambda$  ( $\gamma$  – Лоренц-фактор), процесс КИВЧ может быть использован для невозмущающей диагностики пучков.

Работа поддержана программой «Наука» Министерства образования и науки РФ, грант № 3.1903.2017.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. A.M. Cook et al., //, Phys. Rev. Jett., 2009, 103, 095003.
2. G. Naumenko, A. Potylitsyn et al., //, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B., 2017, 402, 194-197.
3. D. V. Karlovets, A. P. Potylitsyn, //, Phys. Lett. A, 2009, 373, 1988.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ПУЧКА  
ЭЛЕКТРОНОВ ПО УГЛОВОМУ РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ИХ  
КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ

И.Е. Внуков<sup>1)</sup>, Ю.А. Гопонов<sup>1)</sup>, М.А. Сиднин<sup>1)</sup>,  
Р.А. Шатохин<sup>1)</sup>, Y. Takabayashi<sup>2)</sup>, J. Sumitani<sup>2)</sup>

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

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

На основе метода /1/ развита методика расчета угловых распределений когерентного излучения электронов в брегговском направлении с учетом поперечного размера пучка, адекватно описывающая результаты эксперимента /2/. Проведено моделирование зависимости характеристик углового распределения от размера пучка на кристалле. Показано, что измерение горизонтального и вертикального распределений не обеспечивает определение размеров пучка в этих плоскостях из-за их взаимного влияния.

Предложена методика определения размеров пучка на мишени с помощью измерения двумерных угловых распределений излучения для двух расстояний между кристаллом, где генерируется излучение, и координатным детектором. Искомые размеры определяются из результатов «подгонки», где подгоняемой функцией является распределение для меньшего расстояния, а подгоночной функцией - свертка углового распределения на большем расстоянии с двумерным распределением Гаусса, параметры которого однозначно связаны с размерами пучка на мишени и расстояниями между кристаллом и детектором. Определены границы применимости методики.

С помощью развитой методики проведено измерение размеров пучка линейного ускорителя - инжектора источника синхротронного излучения SAGA-LS /2/. Проведено сопоставление полученных значений с результатами альтернативных способов измерения поперечных размеров электронного пучка. Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект №15-12-10019).

ЛИТЕРАТУРА

1. Yu.A. Goponov et. al// NIM B, 2017, V. 402, P. 92.
2. Y. Takabayashi et. al// NIM B, 2017, V. 402, P. 79.

## МОДЕЛЬ УМЕНЬШЕНИЯ УГЛОВОЙ РАСХОДИМОСТИ ПОТОКА, ФОРМИРУЕМОГО СОСТАВНЫМ РЕНТГЕНОВСКИМ ВОЛНОВОДОМ-РЕЗОНАТОРОМ

В.К. Егоров<sup>1)</sup>, Е.В. Егоров<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>ИПТМ РАН, Черноголовка, Россия

<sup>2)</sup>РУДН, Москва, Россия

Экспериментальные исследования функционирования составного плоского рентгеновского волновода-резонатора (СПРВР) показали, что это устройство захватывает поток квазимонохроматического излучения в угловом интервале  $\varphi_1$ , не превышающим удвоенного значения критического угла полного внешнего отражения для материала рефлекторов СПРВР, транспортирует его без ослабления и формирует выходной поток этого излучения с углом расходимости  $\varphi_2$ , который меньше угла захвата радиации.

В то же время согласно теореме Лиувилля, постулирующей неизменность фазового объема любого статистического ансамбля, изменение величины одного из его параметров должно сопровождаться соответствующей вариацией другого параметра ансамбля. Выполненные нами прецизионные дифрактометрические измерения показали, что уменьшение угловой расходимости формируемого потока сопровождается ухудшением монохроматичности и, соответственно, уменьшением длины когерентности этого излучения. Опираясь на полученные экспериментальные результаты, была разработана модель формирования потока рентгеновских лучей составным волноводом-резонатором.

Поток квазимонохроматического излучения, генерируемый лабораторным рентгеновским источником, характеризуется средней длиной волны  $\lambda_0$ , степенью монохроматичности  $\Delta\lambda$  и длиной когерентности  $L = \lambda_0^2 / \Delta\lambda$ . В формируемом СПРВР потоке средняя длина волны сохраняется, а степень монохроматичности будет характеризоваться  $\Delta\lambda_2 = \Delta\lambda + \delta\lambda$ . Разработанная модель позволила связать степень уменьшения угловой расходимости потока  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  и значение ухудшения монохроматичности  $\delta\lambda$  в соответствие с выражением:  $\delta\lambda = \varphi_1 \lambda_0 (\varphi_1 - \varphi_2)$

## ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОНДУЛЯТОР

А. В. Шагин<sup>1,2</sup><sup>1</sup> НИУ «БелГУ», Белгород, Россия<sup>2</sup> ННЦ ХФТИ, Харьков, Украина

Магнитные ондуляторы имеют значительную массу и большую силу притяжения между магнитными парами. Электрический ондулятор лишен таких недостатков, но требует питания от внешних источников высокого напряжения и высоковольтных вакуумных вводов. Мы предлагаем пироэлектрический ондулятор, в котором поперечное периодическое электрическое поле создается при нагреве или охлаждении пироэлектрических пар, установленных в вакууме. При этом внешнее высоковольтное питание не требуется. Недавно эксперименты по отклонению пучка с помощью пироэлектрического дефлектора, состоящего из одной пары пироэлектрических кристаллов, были выполнены на пучке нерелятивистских электронов с энергией 30 кэВ /1/ и на пучке релятивистских электронов с энергией 7 МэВ /2/. Легкий, компактный пироэлектрический ондулятор может быть собран из таких дефлекторов. Напряженность поперечного электрического поля в таком ондуляторе может быть порядка 100 кВ/см, а период порядка 1 см и менее. Питание такого ондулятора осуществляется путем изменения температуры пироэлектриков, которые установлены в вакууме. Обсуждаются свойства, достоинства и недостатки пироэлектрического ондулятора. Работа выполнена при поддержке программы МОиН РФ для ВУЗов, проект №14.578.21.0192 (RFMEFI57816X0192).

## ЛИТЕРАТУРА

1. A.N. Oleinik, A.S. Kubankin, R.M. Nazhmudinov, K.A. Vokhmyanina, A.V. Shchagin and P.V. Karataev Pyroelectric deflector of charged particle beam. // JINST (2016) 11, P08007.
2. О.О. Ивашук, А.С. Кубанкин, А.В. Шагин, И.А. Кишин, А.Н. Олейник Пироэлектрический дефлектор пучка электронов с энергией 7 МэВ // доклад на настоящей конференции

## ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ И ДИФРАГИРОВАННОМ ПЕРЕХОДНОМ ИЗЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОНА В УЛЬТРАТОНКОМ КРИСТАЛЛЕ

С.В. Трофименко, Н.Ф. Шульга  
ННЦ ХФТИ, ХНУ им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина

Рассмотрен процесс последовательного пересечения релятивистским электроном системы из двух параллельных мишеней – толстой аморфной и ультратонкой кристаллической – расположенных на расстоянии  $L$  друг от друга. Изучается излучение, генерируемое частицей в кристаллической мишени вблизи направления Брэгга, представляющее собой сумму параметрического и дифрагированного переходного излучений, интерферирующих друг с другом. Показано, что перестройка электромагнитного поля вокруг электрона после его вылета из аморфной мишени существенно влияет на характеристики излучения в кристаллической мишени. При этом угловое распределение и полный выход излучения отличаются от соответствующих значений, типичных как для толстых (см. например, [1]), так и для ультратонких [2] кристаллов и зависят от расстояния  $L$  между мишенями. При энергиях электрона больше 10 ГэВ такая зависимость имеет место в пределах макроскопически больших значений  $L$ . Исследовано влияние ограниченного размера кристаллической мишени на характеристики излучения в рассматриваемом процессе. Показано, что это приводит к зависимости полного выхода излучения от  $L$  для макроскопически больших значений этого расстояния даже при энергиях электронов меньше 1 ГэВ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Rullhusen P., Artru X., Dhez P. Novel radiation sources using relativistic electrons: from infrared to x-rays, Singapore, World Scientific Publ., 1998, 202 p.
2. Nasonov N. N. // Phys. Lett. A 1998, 246, 148.

УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И ГЕНЕРАЦИЯ  
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СЖАТИИ  
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКА В ВАКУУМЕ

О.О. Ивашук<sup>1</sup>, А.С. Кубанкин<sup>1,2</sup>, А.В. Щагин<sup>1,3</sup>, И.С. Никулин<sup>1</sup>,  
А.Н. Олейник<sup>1</sup>, В.С. Мирошник<sup>3</sup>, В.И. Волков<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> ФИАН имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> ННЦ ХФТИ, Харьков, Украина

Мы предлагаем ускорять заряженные частицы и генерировать рентгеновское излучение при изменении механической силы, приложенной к пьезоэлектрику в вакууме. В нашей работе впервые экспериментально продемонстрирован эффект генерации рентгеновского излучения при механическом сжатии пьезоэлектриков в вакууме. Сжатие приводит к возникновению электрических зарядов и потенциалов на поверхностях пьезоэлектриков и к возникновению электрического поля в вакууме. Электроны ускоряются в электрическом поле и генерируют рентгеновское излучение в положительно заряженном электроде. В эксперименте мы наблюдали генерацию характеристического и тормозного рентгеновского излучения с энергией до 60 кэВ при приложении механической силы. Это означает, что электроны ускоряются в пьезоэлектрическом ускорителе до энергии не меньше 60 кэВ. Работа соавторов из БелГУ поддержана РНФ, проект № 16-19-10535.

## ЗАРЯДКА И ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ВЕКТОРА СПОНТАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

К.В. Зотин, К.Е. Марковец<sup>1)</sup>, Э.И. Рау<sup>1)</sup>, А.А. Татаринцев<sup>1,2)</sup>

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

<sup>2)</sup> ФТИАН, Москва, Россия

Были проведены комплексные исследования кинетики основных характеристик зарядки при электронном облучении сегнетоэлектриков  $\text{LiTaO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3$ : тока вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ)  $I_{\sigma}$ , суммы токов утечки и смещения  $I_{L+D}$ , а также поверхностного потенциала  $V_s$ . Эксперименты проводились в широком диапазоне энергий (от 200 эВ до 10 кэВ) при токе 100 нА на двух поверхностях исходно монокристаллических образцов: плюс и минус Z-среза. Исследования показали наличие большого тока смещения ( $\approx$ падающему току  $I_0$ ) в начальные моменты времени при энергиях первичного пучка  $E_0 \leq 3$  кэВ. Одновременно с этим регистрируемый ток ВЭЭ менял знак на полусферическом электроде (рис. 1).

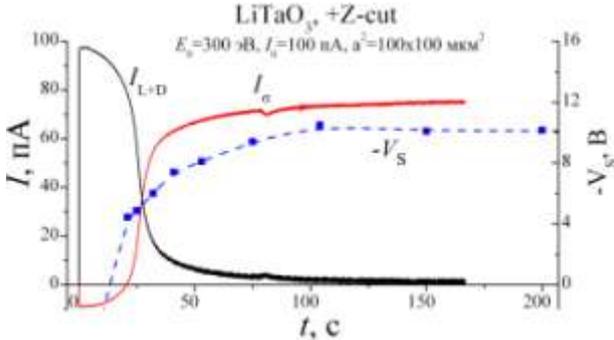


Рис. 1. Кинетические характеристики зарядки +Z-среза  $\text{LiTaO}_3$  при параметрах первичного пучка:  $E_0=300$  эВ и  $j_0=10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00254.

## ЭФФЕКТ ИСЧЕЗНОВЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ПИКА ЛАНДАУ

А.В. Шагин<sup>1,2</sup>, Р.М. Нажмудинов<sup>2,3</sup>, С.В. Трофименко<sup>1,4</sup>,  
А.С. Кубанкин<sup>2,3</sup>, О.О. Ивашук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИИЦ ХФТИ, Харьков, Украина

<sup>2</sup>НИУ «БелГУ», Белгород, Россия

<sup>3</sup>ФИАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>ХГУ, Харьков, Украина

Ионизационные потери измерялись в квадратном кремниевом детекторе размером 10\*10 мм и толщиной 300 мкм, установленном в гониометре. Спектры ионизационных потерь измерялись при различных ориентациях детектора. Методика измерений описана в /1/. Эксперимент был выполнен на ускорителе У70 в Протвино на пучке протонов с энергией 50 ГэВ /2/. Впервые наблюдался эффект исчезновения спектрального пика Ландау при диагональной ориентации детектора. Построена теоретическая модель наблюдаемого эффекта. Результаты измерений сравниваются с расчетами. Обсуждаются возможности применения эффекта для диагностики пучка.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 R.M. Nazhmudinov, A.S. Kubankin, A.V. Shchagin, N.F. Shul'ga, S.V. Trofymenko, G.I. Britvich, A.A. Durum, M.Yu. Kostin, V.A. Maisheev, Yu.A. Chesnokov, A.A. Yanovich // Nucl. Instr. Meth. (2017) B 391 pp. 69–72.
- 2 A.V. Shchagin, N.F. Shul'ga, S.V. Trofymenko, R.M. Nazhmudinov, A.S. Kubankin, O.O. Ivashchuk, A.G. Afonin, G.I. Britvich, A.A. Durum, M.Yu. Kostin, V.A. Maisheev, V.I. Pitalev, Yu.A. Chesnokov, A.A. Yanovich. Appearance and disappearance of the Landau spectral peak. XII International Symposium RREPS, September 18-22, 2017, Hamburg, Germany, Book of Abstracts, p. 133.

ИЗЛУЧЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ КВАНТОВ, НЕЙТРОНОВ И  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ РЕНТГЕНОВСКОМ ОБЛУЧЕНИИ  
ДЕЙТЕРИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

А.В. Багуля<sup>1)</sup>, О.Д. Далькаров<sup>1)</sup>,  
М.А. Негодаев<sup>1)</sup>, А.С. Русецкий<sup>1)</sup>, В.И.Цехощ<sup>1)</sup>  
Б.Ф. Ляхов<sup>2)</sup>, Е. И. Саунин<sup>2)</sup>, А.А. Болотоков<sup>3)</sup>,  
Ю. Ж. Тулеушев<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва,  
Россия

<sup>2)</sup> Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина  
РАН, 119071 Москва, Россия

<sup>3)</sup> ОАО НПП «Радий», 125057, Москва, Россия

<sup>4)</sup> Институт ядерной физики, г. Алматы, 050032,  
Республика Казахстан

Исследовалось излучение рентгеновских квантов, нейтронов и заряженных частиц во время рентгеновского облучения дейтерированных структур. Мишени (дейтерированные CVD-алмаз, палладий, цирконий и титан) облучались с использованием рентгеновской трубки с энергией до 30 кэВ, снабженной поликапиллярной линзой.

Использовались различные типы детекторов: многоканальный детектор нейтронов на основе счетчиков He-3, пластиковый трековый детектор CR-39 и кремниевые поверхностно-барьерные детекторы. Было обнаружено излучение нейтронов с энергией выше 10 МэВ и излучение альфа-частиц в области энергий 7-15 МэВ. Этот результат дает указания о возможности стимулирования многочастичных реакций слияния ядер дейтерия в твердых дейтерированных структурах.

Анализ спектров рентгеновской флуоресценции обнаруживает «дополнительные» пики, которые не идентифицируются ни по одной из линий характеристического излучения. Их внешний вид не может быть связан с каким-либо известным элементом, а также с процессами дифракции. Природа появления «дополнительных» пиков требует отдельного исследования.

## СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРОВ УЛЬТРАКОРОТКИХ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

А.А. Кизириди<sup>1)</sup>, Н.А. Филатов<sup>1)</sup>, А.С. Гоголев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Национальный Исследовательский Томский Политехнический  
Университет,  
Томск, Россия

В работе предложены способы и устройства для измерения поперечных и продольных размеров пучков современных ускорителей с атто- и фемтосекундной длительностью на основе регистрации рассеянного параметрического рентгеновского излучения (ПРИ).

В работах [1, 2] уже продемонстрирована возможность использования ПРИ для измерения поперечных размеров пучков электронов в некогерентном режиме. При переходе к пучкам атто- и фемтосекундной длительности первые рефлексы ПРИ могут удовлетворять условиям когерентной генерации с большим увеличением интенсивности излучения, что не позволяет проводить прямого его наблюдения из-за перегрузки детекторов. Предложенные способы измерения параметров пучков основаны на измерении угловых распределений когерентного ПРИ, интенсивность которого уменьшается дополнительным кристаллом-анализатором до приемлемого для регистрации уровня.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы Российской Федерации Соглашение № 14.578.21.0198 (УИС RFMEFI57816X0198) и Программы повышения конкурентоспособности ТПУ в части предоставления программного обеспечения для моделирования.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

- 1 Y.A. Goponov, M.A. Sidnin, I.E. Vnukov et al. // NIMB 402 (2017) 83–87
- 2 Y. Takabayashi // Phys. Let. A 376 (2012) 2408–2412

GENERATION OF PLASMONS BY FAST ORIENTED ELECTRON  
AND POSITRON AND THE VOLUME CAPTURE IN THE BENT  
CRYSTAL

E.A. Mazur

National Research Nuclear University “MEPHI”, Kashirskoe sh.31,  
Moscow, 115409, Russia

National Research Center «Kurchatov institute», 1, Akademika  
Kurchatova pl., Moscow, 123182, Russia

The theory of the generation of the single-particle and collective excitations in a crystal by a fast-charged quantum oriented relative to the crystallographic axes particle is constructed. The intensity of the generation of excitations in the crystal depending on the level of the transversal both sub barrier and over barrier movement is obtained. It is shown that the loss of transverse energy by the fast quantum charged particle moving in the potential of the curved crystal is leading to the effect of the volume capture of such particles in the crystal. Mathematical modeling of the various modes both of the volume capture and volume reflection of the fast-charged quantum particle in a bent crystal is carried out.

ПРОИЗВОДСТВО ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В  
ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНИ ЭЛЕКТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 7  
ГэВ

Р.М. Нажмудинов<sup>1,2</sup>, А.С. Кубанкин<sup>1,2</sup>, А.В. Щагин<sup>1,3</sup>, О.О. Ива-  
щук<sup>1</sup>, С.В. Трофименко<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>БелГУ, г. Белгород, Россия

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

<sup>3</sup>ИНЦ ХФТИ; Харьков, Украина

<sup>4</sup>ХНУ им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина

В настоящее время позитроны производят в W аморфных и монокристаллических мишенях /1/. Применимость последних ограничена вследствие малой длины деканалирования электронов. Недавно для увеличения производства позитронов было предложено /2/ применять текстурированные поликристаллы, каналирование электронов в которых наблюдалось в /3/. В докладе представлены результаты первых экспериментов в этом направлении на 7-ГэВ-ном электронном пучке ускорителя У-70 в Протвино /4/. В экспериментах при помощи Si детектора, утановленного за вольфрамовой мишенью, наблюдалось рождение заряженных частиц в поликристаллических (аналогичных аморфным) W мишенях толщиной 1.5–12 мм. Обсуждаются результаты и методы измерений. Представлены теоретические оценки.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 X. Artru et al. // *Nucl. Instr. Methods B* 2015, v. 355, 60.
- 2 A.V. Shchagin // *Book of Abstracts of 'Channeling 2016'*, 2016, p. 112
- 3 Y. Takabayashi, K. Ishiji // *Nucl. Instr. Methods B* 2015, v. 355, p. 53.
- 4 R.M. Nazhmudinov, A.S. Kubankin, A.V. Shchagin, O.O. Ivashchuk, N.F. Shul'ga, S.V. Trofymenko, A.G. Afonin, G.I. Britvich, A.A. Durum, M.Yu. Kostin, V.A. Maishev, V.I. Pitalev, Yu.A. Chesnokov, A.A. Yanovich. Observation of Positrons Production in W Target by 7 GeV Electrons. XII International Symposium RREPS, September 18-22, 2017, Hamburg, Germany, Book of Abstracts, p. 136.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЭФФЕКТОВ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ В МЕТАЛЛАХ  
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ НАНОКЛАСТЕРАМИ

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>, З.А. Шарипов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия  
<sup>2)</sup>Софийский университет “Св. Климент Охридски”, София, Болга-  
рия

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

В работе проведено молекулярно-динамическое моделирование эффекта дальнего действия [1] при облучении металлов нанокластерами. В [2] при исследовании тепловых процессов в материале мишени из меди, облучаемой нанокластерами меди, был получен эффект волнового процесса теплопроводности (движущейся области с высокой температурой). Проведенные расчеты показали, что на глубине 5 нм кинетическая температура движущейся области в мишени составляет  $\approx 1300\text{K}$  при глубине проникновения нанокластера 2-3 нм. При одновременном облучении несколькими нанокластерами в глубине мишени происходит слияние движущихся областей с высокой температурой. Температура в области слияния резко возрастает, превышая температуру плавления мишени. Показано, что возникают структурные изменения кристаллической решетки на глубине мишени, превышающей глубину проникновения нанокластеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-01-00661-а и гранта Полномочного представителя Республики Болгарии в ОИЯИ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Апарина Н.П., Мартыненко Ю.В. и др. // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез. 2007. № 3. С. 18-27.
2. B. Batgerel, S. Dimova, I. Puzynin et al. //EPJ Web Conf., 173 (2018) 06001

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ИЗМЕРЕНИЙ НА КОГЕРЕНТНОЕ  
ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В БРЭГГОВСКОМ НАПРАВЛЕНИИ

И.Е. Внуков, Ю.А. Гопонов, М.А. Сиднин,  
Р.А. Шатохин  
НИУ «БелГУ», Белгород, Россия

В целях развития подхода /1,2/ разработана методика расчета выхода параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) и дифрагированного переходного излучения (ДПИ) быстрых электронов в кристаллах, учитывающая появление эллиптической поляризации переходного излучения вследствие разворота поверхности мишени относительно направления падения пучка электронов /3/, асимметрию отражающей плоскости относительно поверхности мишени /4/ и вклад поглощения фотонов в интенсивность переходного излучения. С целью проверки адекватности развитой методики и степени проявления изучаемых факторов на характеристики регистрируемого излучения проведено сопоставление результатов расчетов и измерений. Для сравнения используются результаты экспериментов /5,6/, для которых ожидается уверенное проявление изучаемых эффектов, а сами они выполнены с высокой точностью значений выхода фотонов на электрон. Работа выполнена за счет гранта РФФИ (проект №15-12-10019).

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- 1 S.A. Laktionova et. al //J. Phys. Conf. Ser., 2014, 517, 012020
- 2 Yu.A. Goponov et. al// NIM B, 2017, V. 402, 92.
- 3 М.Л. Тер-Микаэлян, Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. Изд. АН Арм. ССР, Ереван, 1969, 459 с.
- 4 S.V. Blazhevich, A.V. Noskov // NIM B, 2008, V. 266, 3770
- 5 J. Freudenberger et. al// Phys. Rev. Let., 2000, V. 84, 270
- 6 К.-Н. Brenzinger et. al// Z. Phys. A, 1997, V. 358, 107

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДИФРАГИРОВАННОГО  
ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В  
РЕНТГЕНОВСКИХ ЗЕРКАЛАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ  
ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

И.Е. Внуков<sup>1)</sup>, Ю.А. Гопонов<sup>1)</sup>, Р.А. Шагохин<sup>1)</sup>, Y. Takabayashi<sup>2)</sup>,  
J. Sumitani<sup>2)</sup>

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

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

Для проектируемого Международного линейного коллайдера /1/ необходимы новые методы определения параметров пучков сверхбыстрых электронов ( $E_e > 50$  ГэВ) с размером порядка несколько десятков нм и расходимостью  $\sim 10$ -40 мрад. Использование угловых распределений дифрагированного переходного излучения электронов в тонких кристаллах для определения расходимости пучка и оценки его пространственных размеров /2/ неосуществимо вследствие быстрого разрушения кристалла. Использование дифрагированного дифракционного излучения (ДДИ) электронов в кристаллах /3/ также практически нереализуемо из-за малой длины волны  $\lambda$  и необходимости выполнения условия  $b < 0.1\gamma\lambda$ , где  $b$  – расстояние от кристалла до границы пучка. Решением этой проблемы является увеличение  $\lambda$  за счет использования многослойных рентгеновских зеркал /3/, обеспечивающих высокую избирательность  $\Delta\lambda/\lambda \sim 0.04$  и отражающую способность /4/. Выполнен анализ известных методов расчета параметров рентгеновских зеркал: отражающей способности и углового разрешения, и их зависимости от состава зеркал и угла наблюдения. Для выбранного метода и условий измерений проведены расчеты угловых распределений ДДИ. Обсуждается возможность осуществимости и проверки метода на существующих ускорителях электронов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. ILC Technical Design Report, 12 June 2013 // [www.linearcollider.org/ILC/TDR](http://www.linearcollider.org/ILC/TDR)
2. Goponov Yu.A. et al. // NIM, 2016, A808, P. 71
3. Goponov Yu.A. et al. // NIM, 2018, A885, P. 134
4. Барышева М.М. и др. // УФН, 2012, Т. 182, № 7, С. 727

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ  
ПЕРФОРИРОВАНИЯ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ПРИ  
ПРОХОЖДЕНИИ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Г.М Филиппов<sup>1)</sup>, В.А. Александров<sup>2)</sup>, А.В Степанов<sup>3)</sup>

\*E-mail: filippov38-gm@yandex.ru

<sup>1)</sup>Чебоксарский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»,

Чебоксары, РФ

<sup>2)</sup>ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», Чебоксары, РФ

<sup>3)</sup>Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, Чебоксары, РФ

Ранее рассматривался процесс образования пор нанометрового размера в ультратонкой пленке при прохождении волнового пакета частицы /1/. В данной работе исследуется наличие резонанса колебаний вырываемого из пленки диска и его влияние на процесс перфорирования пленки. Предложена модель силы поляризационного взаимодействия пленки с волновым пакетом частицы. Используя построенную нами ранее /2/ модель тонкой углеродной пленки типа Лэнгмюр - Блоджетт, мы прослеживаем процесс взаимодействия многозарядного иона типа  $\text{Xe}^{+40}$ , имеющего энергию порядка нескольких десятков кэВ, с построенной нами пленкой, с целью выяснению возможности ее перфорирования проходящим атомным объектом.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- 1 Г.М. Филиппов, В.А. Александров. Расчет вероятности образования пор при падении многозарядного иона на ультратонкую пленку // Известия РАН, сер. физическая, 2016, т. 80, № 2, с. 139-142.
- 2 Г.М. Филиппов, В.А. Александров, И.В. Лысова, А.В. Степанов. Прохождение волн и частиц через пористые структуры // Тез. докл. XLVII Межд. Тулиновской конф. по физ. взаимод. заряж. част. с крист. // Под ред. проф. М.И. Панасюка. М.: «КДУ», «Университетская книга». 2017. С. 27.

ПРОХОЖДЕНИЕ ВОЛН И ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ УПОРЯДОЧЕННЫЕ  
СТРУКТУРЫ

Г.М Филиппов<sup>1,3)</sup>, В.А. Александров<sup>2)</sup>, А.С. Сабиоров<sup>2)</sup>,  
А.В Степанов<sup>4)</sup>, И.В. Лысова<sup>3)</sup>

\*E-mail: filipov38-gm@yandex.ru

<sup>1)</sup>Чебоксарский институт (филиал) ФГБОУ ВО “Московский политехнический университет”, Чебоксары, РФ

<sup>2)</sup>ФГБОУ ВО “Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова”, Чебоксары, РФ

<sup>3)</sup>ФГБОУ ВО “Чувашский государственный педагогический университет имени И.Я. Яковлева”, Чебоксары, РФ

<sup>4)</sup>Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, Чебоксары, РФ

Некоторые экспериментальные результаты, полученные в последние два-три десятка лет (в процессе развития нано-технологий) обнаружили недостаточность наших знаний в такой хорошо разработанной науке, которой является классическая электродинамика. Было обнаружено anomальное прохождение электромагнитных сигналов через пористые структуры с размерами пор, значительно меньше длины волны. Нечто подобное имеет место в теории интерферометров типа Фабри-Перо или в прохождении электромагнитных волн через слоистые структуры. Найдено anomальное прохождение ядерных частиц высокой энергии через пористую пленку оксида алюминия. В такой ситуации ощущается недостаток данных, в которых производится сравнение поведения потоков классических и квантовых частиц, проходящих через наноразмерные упорядоченные твердотельные структуры. В настоящей работе рассматриваются некоторые задачи из упомянутого круга проблем.

КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЙАНИЕ ФОТОНОВ НА  
АКСИАЛЬНО-КАНАЛИРОВАННОМ ЭЛЕКТРОНЕКалашников Н.П.<sup>1)</sup>, Бадреева Д.Р.<sup>2)</sup><sup>1,2)</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ  
<sup>1)</sup> [kalash@mephi.ru](mailto:kalash@mephi.ru), <sup>2)</sup> [dinkulenok@yandex.ru](mailto:dinkulenok@yandex.ru)

В случае осевого каналирования движение частиц в собственной системе координат может быть представлено как двумерный атом. Поперечное движение каналированных частиц характеризуется дискретным спектром [1]. При рассеянии фотонов на квазисвязанной частице, движущейся в режиме осевого каналирования, возможно возникновение эффекта комбинационного рассеяния, который характеризуется изменением частоты рассеянного фотона: частота рассеянного фотона  $\omega$  есть комбинация частот падающего фотона  $\omega_0$  и частоты  $\omega_{NM}$ , где  $\hbar\omega_{NM} = 2\gamma^2\Delta E_{\perp NM}$  для релятивистского электрона,  $\gamma^2 = E/(mc^2)$ .

В данной работе рассмотрено комбинационное рассеяние одного и двух фотонов на аксиально каналированном электроне, получены кинематика и поперечное дифференциальное сечение данного процесса, проанализированы особенности спектра рамановского рассеяния.

## ЛИТЕРАТУРА :

1. Kalashnikov N.P. Coherent Interactions of Charged Particles in Single Crystals. (Scattering and Radiative Processes in Single Crystals). Harwood Academic Publishers. London and New York. 1988.

## ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА КАНАЛИРОВАНИЯ НА УСИЛЕНИЕ РЕАКЦИИ $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ В АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ

В.М. Быстрицкий<sup>1</sup>, Г.Н. Дудкин<sup>2</sup>, С.И. Кузнецов<sup>2</sup>,  
Ю.Л. Пивоваров<sup>2</sup>, Т.А. Тухфатуллин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия  
<sup>2</sup>Томский Политехнический Университет, Томск, Россия

Измерение сечений реакций синтеза «голых ядер»  $^3\text{He}(d, p)^4\text{He}$ ,  $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$ ,  $^2\text{H}(d, p)^3\text{H}$  и  $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$ ,  $^3\text{H}(^4\text{He}, \gamma)^6\text{Li}$ ,  $^3\text{He}(^4\text{He}, \gamma)^7\text{Be} \rightarrow ^7\text{Li}$  при астрофизических энергиях представляет интерес, как для фундаментальной, так и для прикладной физики. Эти реакции участвуют в примордиальном нуклеосинтезе. Измерение сечений реакций синтеза «голых ядер» дает информацию об эффекте экранирования ядерной реакции электронами.

Как показали эксперименты, поправки на электронное экранирование (увеличение фактора усиления термоядерных реакций  $D(d, n)^3\text{He}$ ,  $D(d, p)^3\text{H}$ ) значительны (кратно превышают адиабатический предел) для случая металлов Ti, Zr, Ta, насыщенных дейтерием  $1/1$ . Однако для реакций  $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ ,  $^3\text{He}(d, p)^4\text{He}$  такая информация полностью отсутствует. Использование металлических мишеней позволит разделить вклады в усиление реакций за счёт процесса электронного экранирования взаимодействующих частиц и за счет каналирования налетающих ионов в кристаллических решётках дейтеридов металлов.

Целью настоящей работы являлось исследование эффекта увеличения выхода нейтронов в реакции  $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$  с использованием дейтерированной мишени из ZrD. Для расчета траекторий дейтронов при каналировании в кристалле ZrD используется компьютерный код ВСМ-2 /2/. В настоящей работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования фактора усиления реакции  $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$  в астрофизической области энергий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. V.M. Bystritsky et al. Nuclear Physics A 889, 2012, 93.
2. S.V. Abdrashitov et al. Nucl. Instrum. Methods B 402 (2017) 106.

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ НАГРЕВЕ И  
ОХЛАЖДЕНИИ ДВУХ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ,  
УСТАНОВЛЕННЫХ В ВАКУУМЕ

О.О. Ивашук<sup>1</sup>, А.С. Кубанкин<sup>1,2</sup>, А.В. Щагин<sup>1,3</sup>, А.Н. Олейник<sup>1</sup>,  
А.А. Кленин<sup>1</sup>, И.С. Никулин<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> ФИАН имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> ННЦ ХФТИ, Харьков, Украина

В эксперименте мы наблюдали рентгеновское излучение от двух пироэлектрических кристаллов, установленных друг напротив друга в вакуумной камере. Векторы поляризации обоих кристаллов были коллинеарны. Оба кристалла одновременно нагревались или охлаждались. При этом на поверхностях кристаллов вырабатывались противоположные заряды, а между кристаллами появлялось электрическое поле. Электроны ускорялись между кристаллами и производили тормозное и характеристическое излучение атомов кристаллов. Представлены измеренные спектры рентгеновского излучения. Энергия тормозного излучения достигает 120 кэВ. Это означает, что электроны ускоряются в промежутке между кристаллами до энергии не менее 120 кэВ. Работа поддержана РФФ, проект № 16-19-10535.

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ  
СОПРОТИВЛЕНИЕ ЦИРКОНИЯ:  
РАСЧЕТЫ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ

Тан Цичэн<sup>1)</sup>, Л.А. Святкин<sup>1)</sup>, И.П. Чернов<sup>1)</sup>

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

Цирконий и сплавы на его основе широко используются для изготовления оболочек топливных элементов ядерных реакторов. В процессе эксплуатации эти материалы подвергаются интенсивному воздействию водорода, приводящему к изменению их эксплуатационных свойств. Так в работе /1/ впервые было экспериментально установлено, что электрическое сопротивление системы Zr-H<sub>x</sub> при концентрациях водорода  $x > 1,5$  резко уменьшается с ростом величины  $x$ . Однако до настоящего момента так и не было дано объяснения наблюдаемого характера зависимости электрического сопротивления циркония от концентрации водорода в нем.

В настоящей работе в рамках теории функционала электронной плотности и теории возмущений функционала электронной плотности методом псевдопотенциала рассчитана температурная зависимость электрического сопротивления  $\rho$  циркония от концентрации  $x$  водорода в его решетке. Вычисленная зависимость  $\rho(x)$  хорошо согласуется с результатами работы /1/ и других экспериментальных исследований. Детальный анализ полученных нами результатов показал, что понижение электрического сопротивления циркония с ростом концентрации водорода связано с тетрагональным искажением ГЦК решетки. Тетрагональные искажения решетки приводят к формированию  $\epsilon$ -гидрида циркония с более слабым электрон-фононным взаимодействием, что, в свою очередь, приводит к уменьшению электрического сопротивления системы Zr-H<sub>x</sub>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bickel P.W., Berlincourt T.G. // Phys. Rev. B, 1970, Vol. 2, P. 4807-4813.

ДИФфуЗИОННЫЕ БАРЬЕРЫ ДЛЯ АТОМА ВОДОРОДА В  
АЛЬФА-ТИТАНЕ: РАСЧЕТЫ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВЛ.А. Святкин<sup>1)</sup>, И.П. Чернов<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Титан и сплавы на его основе широко используются в качестве конструкционных материалов в авиационно-космической, морской и химической промышленности. В процессе эксплуатации эти материалы подвергаются интенсивному воздействию водорода, приводящему к их водородному охрупчиванию. Изучение особенностей механизмов и путей диффузии водорода по решетке титана, является важным фактором борьбы с разрушением конструкционных материалов, а также фундаментом для изучения формирования стабильных и метастабильных гидридных фаз.

В настоящей работе в рамках теории функционала электронной плотности методом псевдопотенциала вычислены барьеры диффузии водорода в  $\alpha$ -фазе титана при концентрации примеси  $\sim 6$  ат.%. Получено, что диффузия водорода в решетке титана осуществляется преимущественно посредством трех диффузионных скачков: тетрапора–тетрапора (энергия активации  $E_a = 0,19$  эВ), осуществляемый вдоль гексагональной оси; тетрапора–октапора ( $E_a = 0,47$  эВ) и октапора–тетрапора ( $E_a = 0,61$  эВ); а также октапора–октапора ( $E_a = 0,75$  эВ), осуществляемый вдоль гексагональной оси. На основании рассчитанных в работе характеристик диффузионных барьеров была получена температурная зависимость коэффициентов диффузии водорода в титане в диапазоне температур от 300 до 700 К.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ  
ДЕФОРМАЦИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ ПОД  
ВОЗДЕЙСТВИЕМ СУБПИКОСЕКУНДНОГО ЭЛЕКТРОННОГО  
ПУЧКА

С.А. Строков<sup>1</sup>), А.С. Гоголев<sup>1</sup>), А.П. Потылицын<sup>1</sup>)

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

В ряде работ /1,2/ предлагалось использовать эффект параметрического рентгеновского излучения для диагностики электронных пучков таких ускорителей, как LCLS или XFEL, где традиционные методы диагностики неприменимы.

Низкоэммиттансные пучки субпикосекундной длительности, характерные для таких установок, при прохождении через кристаллическую мишень вызывают динамические температурные деформации решётки вплоть до повреждения кристаллической структуры /3/.

В работе /3/ показано, что при прохождении макроимпульса из 1000 сгустков с зарядом каждого сгустка 0.25 нКл и выше через алмазную мишень, температура на оси пучка может достигать критической ( $T_{cr} \approx 2273^\circ \text{K}$ ), при которой алмаз теряет свою кристаллическую структуру.

В докладе представлены результаты моделирования температурного изменения параметров решётки для мишеней из алмаза, кремния, германия и вольфрама при прохождении через них единичного пробного сгустка и показана возможность их использования для диагностики субпикосекундных электронных пучков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gogolev A., Potylitsyn A., Kube G., //, Journal of Physics: Conf. Series, 2012, 357, 012018.
2. Takabayashi Y., et al., //, Phys Lett. A, 2012, 376, 2408.
3. А. Бабаев, А. Гоголев, //, Поверхность, 2017, 11, 41-45.

## ОСОБЕННОСТИ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В УГЛЕРОДЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СКОРОСТИ

Ю.А.Белкова, Я.А.Теплова  
НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

При рассмотрении торможения быстрых тяжелых ионов (атомный номер  $Z > 2$ ) в области скоростей ионов  $V > V_0$  необходимо учитывать процессы захвата и потери электронов этими ионами, в результате которых средний заряд ионов становится меньше  $Z$ . Наибольший интерес представляет область максимума потерь энергии, где скорость ионов близка к скорости орбитальных электронов атомов, с которыми происходит столкновение, что приводит к возрастанию вероятности потери и захвата электрона ионами.

Вклад процессов перезарядки в потери энергии может учитываться в качестве отдельной составляющей  $/1/$  или с помощью учета отличия среднего заряда иона  $\bar{i}$  от  $Z$  в зависимости от скоростей ионов. Для торможения ионов в углероде средний заряд можно представить в виде  $/2/ \bar{i} = Z(1 - \exp(-1,25 + 0,32X - 0,11X^2))$ , где  $X = V/(V'Z^{0,45})$  и  $V' = 3,6 \times 10^8$  см/с. Использование этого выражения и приближения Бета-Блоха позволяет определить положение максимума потерь энергии в зависимости от скорости ионов как решение уравнения

$$\frac{1 - \lambda^{-ax}}{x} \left[ \ln \left( \frac{4x^2}{Z_t} \right) - 1 \right] = a\lambda^{-ax} \ln \left( \frac{4x^2}{Z_t} \right),$$

где  $x = V/V_0$ ,  $Z_t$  – заряд ядер мишени. Расчеты, проведенные для торможения ионов углерода в углероде ( $a=0.3$ ), показали, что максимум потерь энергии наблюдается при  $x=3.2$ , что соответствует известному соотношению  $V=V_0Z^{2/3}$ .

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Yu.A. Belkova, N.V. Novikov, Ya.A.Teplova // NIM, 2015, V.343, P.110..
2. K. Shima, T. Ishihara, T. Mikumo // 1984, V.B2, P.222.

ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ПЛОСКОСТНОМ  
КАНАЛИРОВАНИИ В КРИСТАЛЛАХ СО СТРУКТУРОЙ ЦЕЗИЙ  
ХЛОР

Н.В. Максюта, В.И. Высоцкий, С.В. Ефименко,  
Ю.А. Слинченко  
КНУ имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

В [1] при исследовании плоскостного каналирования электронов в главных заряженных плоскостях (100) и (111) в кристаллах со структурой CsCl было показано, что учет дальнедействующего кулоновского взаимодействия приводит к возрастанию глубины потенциальных ям в положительно заряженных плоскостях и к почти полному исчезновению этих ям в отрицательно заряженных плоскостях. В [2] аналогичные тенденции были обоснованы для случая осевого каналирования электронов в этих же кристаллах и исследовалось коротковолновое излучение, возникающее при каналировании слабoreлятивистских электронов.

В данной работе рассчитываются спектры излучения для всех кристаллов со структурой CsCl, возникающего при каналировании релятивистских электронов с Лоренц-факторами  $\gamma = 25, 50, 75$  в главных заряженных плоскостях (100) и (111). Кроме того, в работе проводится сравнение этих спектров излучения со спектрами, возникающими при каналировании электронов с этими же энергиями в электронейтральных плоскостях (например, в плоскостях (110) для этих же кристаллов).

В работе также исследуется влияние температурного фактора на потенциалы взаимодействия, а также на спектры излучения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Н.В. Максюта, В.И. Высоцкий, С.В. Ефименко. Тезисы докладов XLIV Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц в кристаллах, Москва, 2014, С. 18.
2. N.V. Maksyuta, V.I. Vysotskii, S.V. Efimenko, Nucl. Instrum. Methods B 355 (2015) 90.

## ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТОМА С АТОМНОЙ ПЛОСКОСТЬЮ

В.П. Кощеев<sup>1)</sup>, Ю.Н. Штанов<sup>2)</sup>

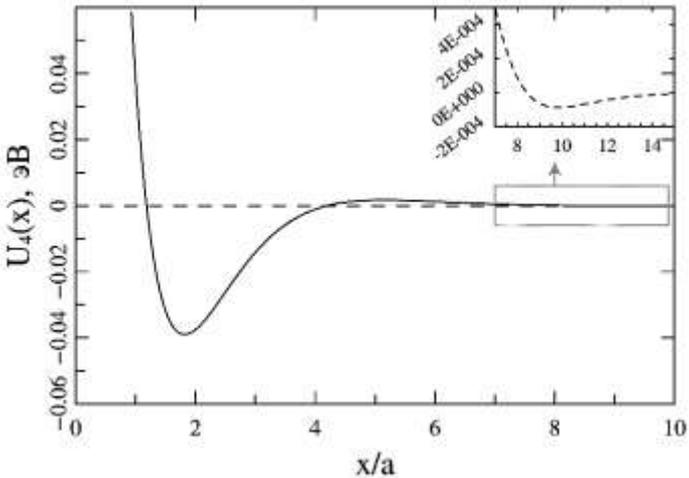
<sup>1)</sup>НИУ МАИ, филиал «Стрела», г. Жуковский, Моск. обл., Россия

<sup>2)</sup>Филиал ТИУ в г. Сургуте, г. Сургут, Россия

На рисунке представлен результат расчета потенциальной энергии взаимодействия атома кремния с атомной плоскостью Si, (111) в непрерывном приближении при температуре 293 К по формуле

$$U_4(x) = -\frac{(Ze)^2 a_y a_z}{96\pi\mu^4} \left[ (-4\mu^2\sigma^2 + \mu x)^3 - 12(-4\mu^2\sigma^2 + \mu x)^2 + \right. \\ \left. + (12\mu^2\sigma^2 + 33)(-4\mu^2\sigma^2 + \mu x) - 48\mu^2\sigma^2 - 15 \right] \exp(2\mu^2\sigma^2 - \mu x),$$

где  $Ze$  – заряд ядра атома кристалла,  $a_y, a_z$  – периодичности расположения атомов,  $a = 1/\mu$  – радиус экранирования Томаса-Ферми,  $d$  – постоянная кристаллической решетки,  $\sigma^2$  – средний квадрат флуктуаций тепловых колебаний атомов кристалла.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗОГНУТЫМ КРИСТАЛЛОМ КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ

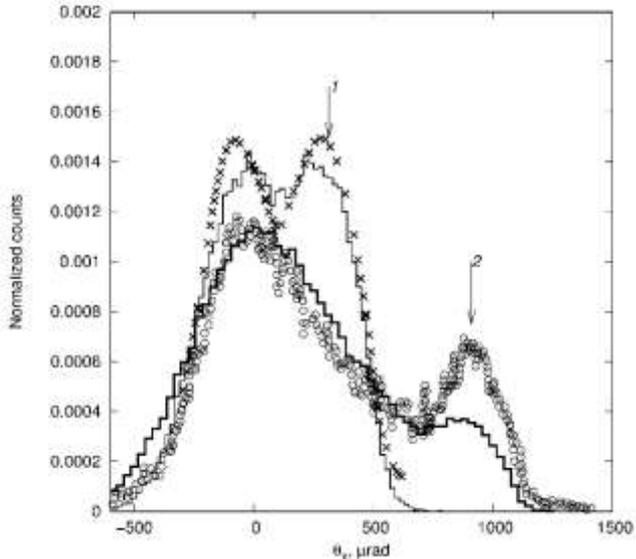
В.П. Кошечев<sup>1)</sup>, Ю.Н. Штанов<sup>2)</sup>, Д.А. Моргун<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>НИУ МАИ, филиал «Стрела», г. Жуковский, Моск. обл., Россия

<sup>2)</sup>Филиал ТИУ в г. Сургуте, г. Сургут, Россия

<sup>3)</sup>Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

На рисунке представлен результат сравнения угловых распределений в эксперименте [1,2] с результатами моделирования (сплошная кривая) по программе TROPICS [3] для электронов с энергией 855 МэВ отклоненных (111) плоскостью изогнутого кристалла кремния толщиной 15 и 30 мкм, соответственно.



### ЛИТЕРАТУРА

1. Sytov A.I., Bandiera L., Salvador D. De. et al. // Eur. Phys. J. C., 2017, V. 77. P. 901
2. Mazzolari A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 135503.
3. <http://wwwinfo.jinr.ru/programs/jinr/lib/tropics/index.html>

ОСОБЕННОСТИ ПОЛЕВОЙ ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ  
ИЗМЕНЕНИИ ПОЗИЦИОННОГО ПОРЯДКА В КОЛЛОИДНЫХ  
РАСТВОРАХ И ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

М.А. Степович<sup>1)</sup>, М.Н. Шипко<sup>2)</sup>, А.Л. Сибирев<sup>2)</sup>, Н.В. Усольцева<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>ФГБОУ ВО «Калужский государственный университет  
им. К.Э. Циолковского», Калуга, Россия

<sup>2)</sup>ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический  
университет им. В.И. Ленина», Иваново, Россия

<sup>3)</sup>ФГБОУ ВО «Ивановский государственный университет»,  
Иваново, Россия

Экспериментально показано, что эмиссия электронов из коллоидных растворов и жидких кристаллов при воздействии на них биполярными электрическими импульсами ( $U \sim 9$  кВ,  $\tau \sim 3 \cdot 5 \cdot 10^{-6}$  с,  $f \sim 10^3$  Гц) может быть использована для изучения механизмов трансформации позиционного порядка элементов структуры жидкой среды, упорядочивающейся под действием слабого импульсного магнитного поля. Установлено, что характер изменения такого порядка зависит от длительности магнито-импульсной обработки: магнитное поле усиливает процесс самосборки, формируется позиционный порядок, соответствующий гексагональной структуре или полиморфным модификациям кубической структуры. Полученные результаты указывают на возможность использования мицеллярных растворов в качестве физической модели для изучения механизмов упорядочения дефектов и атомов в конденсированных средах, где мицеллы выполняют роль атомов и точечных дефектов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Ивановской области (проект № 18-43-370012) и гранта РФФИ и правительства Калужской области (проект № 18-42-400001).

## ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ОТРАЖЕНИЕ ЧАСТИЦ ОТ ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА

Д.С. Мелузова, П.Ю. Бабенко, А.П. Шергин, А.Н. Зиновьев  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Обнаружена зависимость коэффициента отражения от формы потенциала взаимодействия атом-поверхность для системы D-W. Были рассмотрены потенциалы с различной глубиной потенциальной ямы  $U$ . Для описания отталкивающей части потенциала использовался потенциал Зиновьева [1], а притягивающая часть описывалась потенциалом типа Леннарда-Джонса с варьированием величины  $U$ . Расчёт был проведён путём моделирования траекторий налетающих частиц с учётом взаимодействия налетающей частицы с атомами решётки, находящимися на расстоянии менее  $3d$  от траектории налетающей частицы, где  $d$  – постоянная решётки. Результаты расчётов приведены на рис. 1.

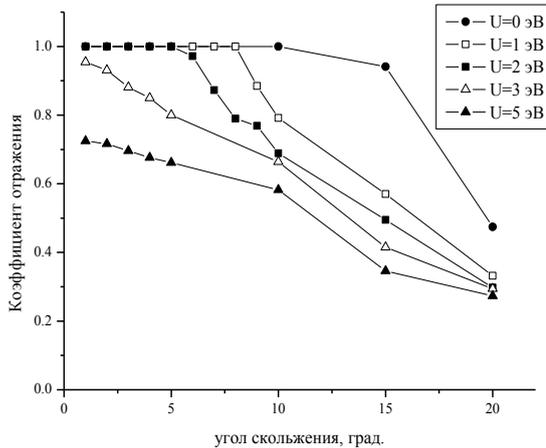


Рис.1. Коэффициенты отражения при рассеянии атомов D с энергией 400 эВ на кристаллическом вольфраме для разных форм потенциала взаимодействия.

### ЛИТЕРАТУРА

1. A.N. Zinoviev // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 2011, 269, p.829.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ ЧАСТИЦ НА АМОРФНЫХ И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МИШЕНЯХ

А.Н.Зиновьев, А.М.Девятков, Д.С.Мелузова  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Для моделирования рассеяния атомных частиц (атомов, ионов) на аморфных и поликристаллических мишенях разработан численный код, использующий приближение бинарных соударений /1/. В отличие от широко известного кода SRIM /2/ имеется возможность задавать любой тип потенциала и зависимость неупругой потери энергии от параметров соударения. Угол рассеяния вычисляется точно без использования «магического приближения». При вычислении угла рассеяния замена переменной устраняет особенность в подынтегральном выражении, и сам угол рассеяния вычисляется численно с помощью интегрирования с использованием разложения по полиномам Гаусса. Учитываются тепловые колебания атомов мишени.

Для поликристаллической мишени пространственное расположение атомов решетки задается путем розыгрыша случайного направления кристаллических осей в пространстве. Для аморфной мишени учитывается наличие ближнего порядка. Расположение атомов в пространстве моделируется в виде кластера. Среднее расстояние между атомами определяется из плотности вещества. Количество оборванных валентных связей задается в виде свободного параметра. Он может быть также рассчитан из различия в плотности кристаллической и аморфной мишени, либо определен из данных по дифракции рентгеновских лучей.

Наличие вакансий в приповерхностном слое разыгрывается случайно. Вероятность  $P$  иметь вакансию меняется линейно по глубине  $z$ , при этом  $P=0$  при  $x=h$  и  $P=1$  при  $z=-h$ , где  $h$  – высота шероховатости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. M.T. Robinson, I.M. Torrens // Phys. Rev., 1974, В 9, 5008.
2. J.F. Ziegler, J.P. Biersack // SRIM - <http://www.srim.org>.

ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ  
ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 7 ГЭВ

А.В. Шагин<sup>1,2</sup>, Р.М. Нажмудинов<sup>2,3</sup>, С.В. Трофименко<sup>1,5</sup>,  
Н.Ф. Шульга<sup>1,5</sup>, А.С. Кубанкин<sup>2,3</sup>, О.О. Иващук<sup>2</sup>, А.Г. Афонин<sup>4</sup>,  
Г.И. Бритвич<sup>4</sup>, А.А. Дурум<sup>4</sup>, М.Ю. Костин<sup>4</sup>, В.А. Маишеев<sup>4</sup>,  
В.И. Питалев<sup>4</sup>, Ю.А. Чесноков<sup>4</sup>, А.А. Янович<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ННЦ ХФТИ, Харьков, Украина

<sup>2</sup>НИУ «БелГУ», Белгород, Россия

<sup>3</sup>ФИАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>ФГБУ ГНЦ ИФВЭ, Протвино, Россия

<sup>5</sup>ХГУ, Харьков, Украина

В работе измерены спектры ионизационных потерь в кремниевом детекторе толщиной 300 микрометров, измеренных на пучках электронов и позитронов с одинаковой энергией 7 ГэВ. Измерения выполнялись на ускорителе У70 в Протвино, методика измерений описана в [1]. Спектры измерялись в диапазоне энергий от единиц до 580 кэВ и содержат спектральный пик Ландау с энергией 84 кэВ. Измеренный диапазон энергий превышает энергию спектрального пика Ландау в 7 раз. Измеренные спектры практически совпадают с точностью до статистической погрешности. Наши измерения представляют прямое подтверждение инвариантности ионизационных потерь относительно знака заряда ультрарелятивистских лептонов в измеренном диапазоне энергий.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. R.M. Nazhmudinov et al, A.S. Kubankin, A.V. Shchagin, N.F. Shul'ga, S.V. Trofymenko, G.I. Britvich, A.A. Durum, M.Yu. Kostin, V.A. Maisheev, Yu.A. Chesnokov, A.A. Yanovich. // Nucl. Instrum. Methods (2017) B 391, pp. 69–72.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСФОРМАТОР В ВАКУУМЕ  
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.В. Щагин<sup>1,2</sup>, В.С. Мирошник<sup>2</sup>, В.И. Волков<sup>2</sup>, А.С. Кубанкин<sup>1</sup>,  
О.О. Ивашук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Международная научно-образовательная лаборатория радиационной физики НИУ БелГУ, Белгород, Россия

<sup>2</sup>Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт, Харьков, Украина

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования по генерации рентгеновского излучения с помощью керамического пьезоэлектрического трансформатора, установленного в вакууме /1/. Рентгеновское излучение испускалось при работе пьезоэлектрического трансформатора, который питался переменным напряжением с эффективным значением 60 Вольт на резонансной частоте около 20 кГц. В измеренных спектрах рентгеновского излучения наблюдается пик характеристического излучения титановой мишени с энергией 4.5 кэВ на фоне тормозного излучения. Максимальная энергия тормозного рентгеновского излучения достигает 12 кэВ. Это означает, что электроны ускоряются в вакууме до энергии не менее 12 кэВ. Работа соавторов из БелГУ поддержана РНФ, проект № 16-19-10535.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А. В. Щагин, В. С. Мирошник, В. И. Волков, А. С. Кубанкин, О. О. Ивашук, Генерация рентгеновского излучения с помощью пьезоэлектрического трансформатора. // Стекло и керамика (2017) 11 сс. 24-26.

ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДЕФЛЕКТОР ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ С  
ЭНЕРГИЕЙ 7 МэВ

О.О. Иващук<sup>1</sup>, А.С. Кубанкин<sup>1,3</sup>, А.В. Щагин<sup>1,2</sup>, И.А. Кищин<sup>1,3</sup>,  
А.Н. Олейник<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> ННЦ ХФТИ, Харьков, Украина

<sup>3</sup> ФИАН имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

В работе наблюдалось отклонение пучка релятивистских электронов с энергией 7 МэВ в поперечном электрическом поле, которое создается с помощью пироэлектрического дефлектора /1/. Эксперимент выполнялся на микротроне в ускорительном комплексе ФИАН «ПАХРА» в Троицке. Отклонение пучка ускоренных электронов с энергией 7 МэВ на угол  $1.43^{\circ}$  наблюдалось на экране, установленном на расстоянии 70 см от дефлектора. Напряженность поперечного электрического поля, созданного пироэлектрическим дефлектором, составляла 75 кВ/см при нагреве кристаллов от комнатной до 50 градусов Цельсия. Обсуждаются перспективы создания пироэлектрического ондулятора. Работа выполнена при финансовой поддержке программы МОиН РФ для ВУЗов, проект №14.578.21.0192 (RFMEFI57816X0192).

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. A.N. Oleinik, A.S. Kubanin, R.M. Nazhmudinov, K.A. Vokhmyanina, A.V. Shchagin and P.V. Karataev, Pyroelectric deflector of charged particle beam. // JINST (2016) 11, P08007.

## ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 10 кэВ ЧЕРЕЗ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАКРОКАНАЛЫ

К.А. Вохмянина, В.С. Сотникова, А.А. Каплий, А.С. Кубанкин,  
И.С. Никулин

Международная научно-образовательная лаборатория  
радиационной физики НИУ «БелГУ», г. Белгород, Россия

Возможность управления пучками заряженных частиц с помощью диэлектрических поверхностей была продемонстрирована сравнительно недавно [1,2]. Данный эффект обусловлен образованием на стенках диэлектрического канала самосогласованного рядового распределения, обеспечивающего прохождение части пучка без непосредственного контакта с поверхностью канала. Эффективность управления электронами, проходящими через диэлектрический канал, характеризуется величиной тока пучка, энергетическим состоянием прошедших через канал электронов и угловыми характеристиками прошедшего пучка. Энергию электронов, прошедших через диэлектрический канал, можно оценить на основе анализа рентгеновского спектра, генерируемого электронами в медной пластине, установленной в непосредственной близости к выходу канала. Данный анализ проведен для плоских и сужающихся каналов, изготовленных из керамических пластин. Результаты экспериментов указывают на возможность эффективного использования керамических пластин в качестве автономных элементов электронной оптики.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Министерства образования и науки Российской Федерации для высших учебных заведений, проект №14.578.21.0192 (RFMEFI57816X0192).

### ЛИТЕРАТУРА

1. А.Ю. Басай, С.А. Воробьев, В.В. Каплин, Е.И. Розум, А.М. Слупский // Письма в ЖТФ, 1988, том 14, вып. 9, стр. 849-854
2. N. Stolerfoht, J.H. Bremer, V. Hoffmann, D. Fink, R. Hellhammer, A. Petrov, B. Sulik // Phys. Rev. Lett., 2002, 88, 133201

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ В ИСТОЧНИКАХ РЕНТГЕНОВСКОГО И НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.А. Андрианов, А.Л. Ерзинкян  
НИИЯФ МГУ, Москва, Россия.

В настоящее время ведутся работы по созданию и применению малогабаритных рентгеновских и нейтронных источников на основе пироэлектрических кристаллов. В данных устройствах в циклах нагрева и охлаждения кристаллов создаются большие электрические поля напряженностью до 100 кВ/см, которые используются для создания интенсивных электронных и ионных пучков. В рентгеновских источниках столкновение электронного пучка с мишенью приводит к генерации рентгеновского излучения. В нейтронных источниках пучок ионов дейтерия направляется на мишень, содержащую атомы дейтерия. В результате происходит реакция ядерного синтеза  $D+D=^3\text{He}+n$ , приводящая к испусканию нейтрона.

В простой модели, напряжение между полярными гранями кристалла  $U_{\text{ст}}$  прямо пропорционально изменению температуры  $\Delta T$ , и для кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiTaO}_3$  напряжение  $U_{\text{ст}}(\Delta T=100^\circ\text{C})$  должно превышать 300 кВ. Однако, в практических устройствах эта простая закономерность не наблюдается. По мере повышения температуры напряжение выходит на насыщение, которое заметно меньше 100 кВ. Напряжение в пироэлектрических устройствах ограничивается рядом факторов, в том числе токами утечек и электрическими пробоями. При больших напряжениях характерна временная и пространственная неоднородность электронного пучка [1]. В целом, реальная картина процессов, происходящих в этих устройствах, остается неясной.

В настоящем докладе будут рассмотрено влияние скорости нагрева/охлаждения и остаточной проводимости кристаллов, на характеристики рентгеновских источников. В докладе будут представлены экспериментальные данные и результаты модельных расчетов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Андрианов, др. // Поверхность, 2017, № 7, 25.

SUB-GEV ELECTRONS SCATTERING BY ULTRATHIN  
CRYSTALSY. Takabayashi<sup>1</sup>, Yu. L. Pivovarov<sup>2</sup>, T. A. Tukhfatullin<sup>2</sup><sup>1</sup>SAGA Light Source, 8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga 841-0005, Japan<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk 634050,  
Russia

In this work we continue experimental and theoretical studies of 255 MeV electrons scattering by thin crystals at the linac injector of SAGA-LS accelerator facility. In the previous experiments /1-4/ we studied the doughnut scattering, scattering at planar alignment and mirroring by the half-wave crystal.

Here, we report on experimental studies and computer simulations of 255 MeV electrons scattering in an ultrathin 0.47  $\mu\text{m}$  Si crystal at (220) and (111) alignment. At zero incident angle with respect to the channeling planes the angular distributions of scattered electrons reveal the peak structure depending on the shape of continuous (111) and (220) planar potentials. The computer simulations performed with BCM-2.0 code [5] allow explain the experimental data in terms of one-dimensional rainbow scattering (1D-RS) if introducing instead of impact parameter as in 3D-RS two new parameters: a point of incidence  $x$  of electron into a crystal and crystal thickness  $L$ . Similar to 3D-RS, the scattering angle indeed becomes the multiple-valued function of  $x$  allowing 1D-RS interpretation.

## REFERENCES

1. Y. Takabayashi, Yu.L. Pivovarov, T.A. Tukhfatullin. Physics Letters A378 (2014) 1520.
2. Y. Takabayashi, V.G. Bagrov, Y.P. Pivovarov, O.V. Bogdanov, T.A. Tukhfatullin. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 355 (2015) 188.
3. Y. Takabayashi, Yu.L. Pivovarov, T.A. Tukhfatullin. Physics Letters B 751 (2015) 453.
4. Y. Takabayashi, Yu.L. Pivovarov, T.A. Tukhfatullin. Physics Letters A 382 (2018) 153.
5. S.V. Abdrashitov, O.V. Bogdanov, K.B. Korotchenko, Yu.L. Pivovarov, E.I. Rozhkova, T.A. Tukhfatullin, Yu.L. Eikhorn. Nucl. Instrum. Methods B402 (2017) 106.

## КАНАЛИРОВАНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ПОЛУВОЛНОВОМ КРИСТАЛЛЕ

Ю.Л. Пивоваров<sup>1</sup>, Т.А. Тухфатуллин<sup>1</sup>,<sup>1</sup>Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет, Томск, Россия

Полуволновой кристалл (Half Wavelength Crystal - HWC) – ультратонкий кристалл, в котором частица совершает одно столкновение (фактически отражение) с кристаллографической плоскостью. Эксперименты выполнены в огромном диапазоне энергий – от 2 МэВ до 400 ГэВ протонов /1-2/ и 255 МэВ электронов /3/.

В работе компьютерным моделированием исследованы специфические угловые распределения релятивистских тяжелых ионов (РТИ), прошедших через HWC. Для расчета траекторий РТИ используется компьютерный код ВСМ-2.0 /4/. Обнаружена и детально исследована чувствительность угловых распределений РТИ, прошедших через HWC, к заряду, энергии и массе РТИ (изотопический эффект). Это представляет интерес для программы исследования на установке Super-FRS FAIR /5/ с точки зрения использования HWC как эффективного дефлектора, так и фильтра скоростей, зарядов и масс РТИ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Guidi V. et al. // Phys. Rev. Lett. (2012) 108 014801
2. Scandale W. et al. // Phys. Lett. B (2014) 734 1
3. Takabayashi Y., Pivovarov Yu.L., Tukhfatullin T.A. // Phys. Lett. B 751, 2015, 453.
4. Abdrashitov S.V., Bogdanov O.V., Korotchenko K.B., Pivovarov Yu. L., Tukhfatullin T. A. // Nucl. Instrum. and Meth. B 402 (2017) 106-111
5. Geissel H., Bogdanov O.V., Scheidenberger C., Pivovarov Yu.L., Kuzminchuk-Feuerstein N., Rozhkova E.I., Tukhfatullin T.A., and the Super-FRS Experiment Collaboration. // GSI Scientific Report 2016, p. 179. DOI:10.15120/GR-2017-1

СТРУКТУРА ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА  
КАНАЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ В  
КРИСТАЛЛЕ КРЕМНИЯ

В.В. Сыщенко, А.И. Тарновский  
НИУ «БелГУ», Белгород, Российская Федерация

Известно /1/, что движение заряженных частиц в кристалле может быть как регулярным, так и хаотическим с классической точки зрения, при этом на квантовом уровне хаотичность проявляется, в частности, в статистических свойствах массивов уровней энергии. Для электронов, каналированных вблизи направления  $[110]$  кристалла кремния, эти свойства исследовались в /2/. Случай каналирования вблизи направления  $[100]$  представляет отдельный интерес /3/, так как в этом случае движение будет регулярным для одних начальных условий и хаотическим для других. В настоящем докладе представлены результаты вычисления доли фазового пространства, занятой регулярными (рис. 1) и хаотическими траекториями для электронов и позитронов.

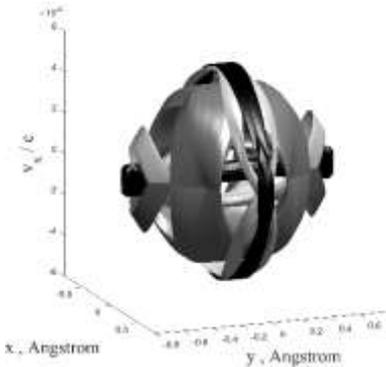


Рис. 1. Проекция фазового пространства каналированного позитрона с энергией продольного движения 1 ГэВ и поперечного движения 1,37 эВ на трехмерное пространство  $(x, y, v_x)$ . Показаны области, занятые регулярными траекториями.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 15-12-10019).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф., Трутень В.И., Гриненко А.А., Сыщенко В.В. // УФН (1995) **165**, № 10, 1165.
2. Шульга Н.Ф., Сыщенко В.В., Тарновский А.И., Исупов А.Ю. // Поверхность (2015) № 7, 72.
3. Berry M.V., Robnik M. // J. Phys. A (1984) **17**, 2413.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА  
ПРОВОДЯЩЕЙ СФЕРЕ И ПОЛУСФЕРИЧЕСКОМ ВЫСТУПЕ В  
ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛОСКОСТИ

В.В. Сыщенко, Э.А. Ларикова  
Белгородский государственный национальный исследова-  
тельский университет (НИУ «БелГУ»),  
Белгород, Российская Федерация

В /1/ был предложен подход к описанию переходного и дифракционного излучения нерелятивистской заряженной частицы на идеально проводящей сфере, основанный на известном в электростатике методе изображений /2/. В /3/ этот подход был распространен на задачу о дифракционном излучении на полусферическом выступе в проводящей плоскости.

В работах /1, 3/ была найдена спектрально-угловая плотность излучения в этих случаях. В настоящем докладе представлены результаты расчетов поляризации возникающего излучения.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 15-12-10019).

ЛИТЕРАТУРА

1. Shul'ga N.F., Syshchenko V.V., Larikova E.A. // Nuclear Instrum. Methods B, 2017, v. 402, p. 167-172.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред, М., Наука, 1992, 664 с.
3. Syshchenko V.V., Larikova E.A., Gladkih Yu.P. // JINST, 2017, v. 12, C12057.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УДАЛЕННЫХ НЕЗАТУХАЮЩИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН

В.И. Высоцкий<sup>1</sup>, А.А. Корнилова<sup>2</sup>, Т.Б. Криг<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Киевский университет им.Т.Шевченко, Украина

<sup>2</sup>МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия

В работе /1/ было теоретически предсказано, а в работах /1,2/ экспериментально подтверждено, существование незатухающих температурных волн, которые могут без диссипации распространяться на большое расстояние. Такие волны могут существовать в разных средах только на определенных и характерных для этих сред дискретных частотах  $\omega_n = \pi(n + 1/2)/\tau$   $n = 0, 1, \dots, N_{\max}$ , причем эти частоты определяются только длительностью локальной термодинамической релаксации, а число таких частот  $N_{\max} \approx \tau / \Delta t$  определяется длительностью возбуждающего теплового импульса  $\Delta t < \tau$ . Также было теоретически показано и подтверждено в экспериментах, что в воздухе минимальная частота таких волн зависит от его влажности, давления и температуры. При нормальных условиях она равна  $\omega_0 \approx 75 \div 85$  МГц.

В данной работе исследуется вопрос об особенностях дальнего распространения и угловых характеристиках этих волн на большом расстоянии от области возбуждения. Проведены измерения характеристик этих волн в интервале от 12,5 см до максимально доступного (в лаборатории) расстояния 192 см. Обнаружено, что амплитуда волны на основной частоте 85 МГц вначале возрастает в 2 раза в интервале от 12÷50 см при удалении от источника (внешней поверхности стенки кавитационной камеры), а затем слабо убывает соответственно угловой расходимости. Диаметр волнового поля на расстоянии 192 см равен  $\approx 50$  см.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Vysotskii V.I., A.O. Vasilenko, Vassilenko V.B., Vysotsky M.V. // Inorganic Materials: Applied Research, 2015, V.6, No.3, pp.199–204.
2. Высоцкий В.И., Корнилова А.А., Василенко А.О., Томак В.И.// Поверхность, 2014, № 11, с.106–112.
3. Vysotskii V.I., Kornilova A.A., Vasilenko A.O. // Current Science, 2015, v.108, No.4, pp.114-119.

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ, ЭВОЛЮЦИЯ И КОЛЛАПС КОРРЕЛИРОВАННОГО ПАКЕТА

В.И. Высоцкий, М.В.Высоцкий

Киевский университет им.Т.Шевченко, Украина

Традиционный метод анализа процессов взаимодействия движущихся частиц с материальными средами основывается на их представлении в виде неограниченных квазиплоских волн. Лучшее описание таких процессов может быть получено в случае представления частиц в форме ограниченных (чаще всего – гауссовых) нормированных волновых пакетов с начальной шириной  $\Delta x(0) = u$

$$\Psi(x, t) = \left\{ \left( u + \frac{i\hbar}{mu} \right) \sqrt{\pi} \right\}^{-1/2} \exp \left\{ \frac{-(x - v_0 t)^2}{2u^2 (1 + t^2 \hbar^2 / m^2 u^4)} \right\}, \quad (1)$$

которые распространяются со скоростью  $v_0$ , быстро уменьшаются по амплитуде и расплываются по протяженности

$\Delta x \approx \sqrt{u^2 + (t\hbar / mu)^2}$  (см., рисунок, верхний ряд). Эти пакеты соответствуют некоррелированным состояниям частиц. Более адекватными являются коррелированные пакеты

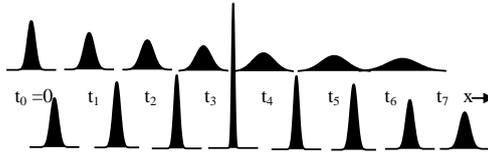
$$\Psi(x, t) = \left[ \left( u + i\hbar g / mu \right) \sqrt{\pi} \right]^{-1/2}. \quad (2)$$

$$\exp \left\{ \frac{-(x - v_0 t)^2 g + i \left[ g^2 \hbar^2 t^2 / mu^2 + m v_0 (2x - v_0 t) u^2 / \hbar \right]}{2u^2 (1 + g^2 t^2 \hbar^2 / m^2 u^4)} \right\}, g = 1 + i\rho$$

с аналогичной к (1) функцией начального распределения

$|\Psi(x, 0)|^2 = \{ \pi u^2 \}^{-1/2} e^{-x^2/u^2}$ , которые отличаются наличием коэф-

фициента корреляции  $r = \rho / \sqrt{1 + \rho^2}$ . Пространственно-временная эволюция обычного (верхний ряд) и коррелированного (нижний ряд) пакетов представлена на рисунке.



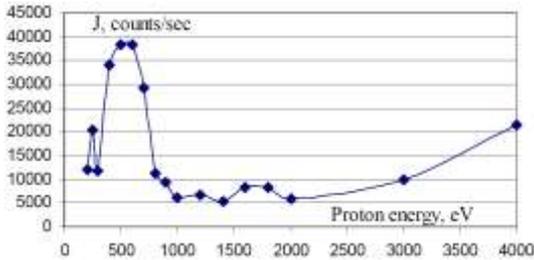
Видно, что движение коррелированного пакета приводит к его пространственному коллапсу (самосжатию) с очень большим возрастанием флуктуации кинетической энергии.

## МЕХАНИЗМ АНОМАЛЬНО ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА ПРИ ОРИЕНТАЦИОННОМ ДВИЖЕНИИ МЕДЛЕННЫХ ПРОТОНОВ В КРИСТАЛЛЕ ЛИТИЯ

В.И. Высоцкий, М.В.Высоцкий

Киевский университет им.Т.Шевченко, Украина

В работе /1/ были представлены результаты эффективного ядерного синтеза на основе реакции  $\text{Li}^7\text{p}$  с использованием пучка протонов низкой энергии, взаимодействующего с тонкой мишенью из лития или с парами лития. Аномалия данных результатов состояла в том, что максимум  $\text{Li}^7\text{p}$  реакции с регистрацией быстрых альфа-частиц с  $E=8.6$  МэВ соответствовал энергии протонов 500 эВ. При “стандартном” описании сечение реакции  $\sigma(E) \approx 10^{-74}$  см<sup>2</sup> очень мало, а интенсивность выхода альфа-частиц  $J \approx 10^{-43}$  с<sup>-1</sup> в этой реакции будет в  $10^{47}$  раз меньше данных экспериментов!



Нами показано, что механизм реализации такой реакции связан с автомоделным формированием ККС (когерентных коррелированных состояний) медленных протонов при их движении в пределах  $3 \div 4$  первых (поверхностных) периодов решетки лития, если это движение рассматривать, как нахождение протона в поле нестационарного гармонического осциллятора в движущейся системе координат /2,3/. В этом случае формирование ККС приводит к очень большим флуктуациям поперечной кинетической энергии  $\delta E_{\perp} \geq 50 \text{ KeV}$ , которые связаны с соотношением неопределенностей Шредингера-Робертсона  $\delta E_{\perp} \delta t \geq \hbar / 2\sqrt{1-r^2}$  /2,3/ при большом коэффициенте корреляции  $|r| \rightarrow 1$ .

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. S. Lipinski, H. Lipinski. Hydrogen-lithium fusion device, Intern. patent WO 2014/189799 A9 (Priority date 22.05.2013).
2. V.I.Vysotskii, M.V.Vysotsky // Eur. Phys. Jour. A, 2013, v.49, 99.
3. V.I.Vysotskii, S.V.Adamenko, M.V.Vysotsky // Annals Nucl. Energy, 2013, v. 62, 618.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИОНООБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСПРЕЙНОЙ ИОНИЗАЦИИ ПРИ ВЫСОКОМ ВАКУУМЕ

Ш.Дж. Ахунов, Д.Т.Усманов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, АН РУз,  
Ташкент, Узбекистан

В настоящей работе изучены фундаментальные основы механизма ионообразования методом электроспрейной ионизации (ЭСИ) при высоковакуумных условиях. ЭСИ при атмосферном воздухе была разработана в конце прошлого века и позволила успешно работать со сложнейшими биоорганическими молекулами [1]. К настоящему времени существуют две основные теории, объясняющие конечное производство ионов в газовой фазе, но несмотря на множество исследований для выявления механизма ионообразования до сих пор не сформирована достоверная, общая теория ЭСИ. Поэтому исследовать детально физико-химических и фундаментальных характеристик ионообразования методом ЭСИ является актуальной фундаментальной задачей.

Цель исследований данной работы являлось выявить фундаментальные закономерности процесса ионообразования электроспрейной ионизации в высоковакуумных условиях на примере пептидов.

В работе впервые разработаны вакуумный электроспрейный ионизационный источник и система подачи жидкого анализа к электроспрейному эмиттеру на базе заводского масс-спектрометра МИ-1201. Получены стабильные пучки в форме Тейлор-кона и предварительные масс спектры ЭСИ пептидов (граммицидин С и инсулин), а также исследованы зависимости порога ионообразования от напряжения эмиттера.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. M. Yamashita and J.V. Fenn, //, J. Phys. Chem. 1984, 88 (20), pp 4451–4459

## ВОЗДЕЙСТВИЕ СЛАБОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СИСТЕМУ МЕТАЛЛ-ВОДОРОД

И.П. Чернов<sup>1)</sup>, В.М. Силкин<sup>1,2)</sup>, Ю.И. Тюрин<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Томский политехнический университет, г. Томск, Россия.<sup>2)</sup>Donostia International Physics Center and University of the Basque Country, San Sebastián, Spain

Ускоренная диффузия и выход водорода из металлов под действием рентгеновских лучей и электронов изучается достаточно давно в связи с проблемой водородного охрупчивания конструкционных материалов ядерных и термоядерных реакторов. Исследования показали, что при воздействии излучения ниже порога образования дефектов энергия внешнего излучения полностью поглощается в объёме на возбуждение электронной подсистемы атомов кристалла с последующей передачи водородной подсистеме. Вместе с тем недавно появились экспериментальные факты, свидетельствующие о том, что при нагреве электрическим током никеля или палладия, содержащих водород, атомы водорода выходят из образца при температуре значительно ниже чем при тепловом нагреве. В то же время в Ti и Zr приложенное электрическое поле не влияет на температуру выхода.

Известно, что электромагнитное поле, создаваемое электрическим током, обладает низкой энергией и проникает в металл на малую глубину. Чтобы понять механизм ускорения водорода слабым внешним электрическим полем, в настоящей работе в рамках первопринципного подхода выполнены расчёты динамических и статических электронных возбуждений в Pd, Pd-H (Ni, Ni-H) и для гидридо-образующих металлов Ti и Zr (вместе с Zr-H и Zr-H). Мы приводим сравнение энергии доминирующих коллективных электронных возбуждений (плазмонов) в этих системах в объёме и в поверхностной области. Также будут приведены детальное пространственное распределение колебаний электронной плотности в поверхностной области и в объёме.

## ГИПЕРЗВУКОВЫЕ МОДЕЛИ ЭФФЕКТА ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ И ГИБРИДНЫХ (ЖИДКОСТНО-ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ) СИСТЕМАХ ПРИ ИОННОМ И СВЕТОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Д.И. Тетельбаум<sup>1)</sup>, А.В. Степанов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Университет Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>2)</sup>ЧГСХА, Чебоксары, Россия

Эффект дальнего действия (ЭД) при ионном, световом и других видах взаимодействия на поверхность твердого тела давно привлекает внимание ряда исследовательских групп. Недавно обнаружено сверхдальнее распространение светового возбуждения кремния в гибридной системе, где проводником возбуждения служила граница твердое тело–водный раствор NaCl. Настоящая работа посвящена развитию гиперзвуковой модели ЭД [1,2] с применением метода молекулярной динамики [3]. Рассмотрена задача о генерации и распространении в кремнии деформационных импульсов, возникающих в слое естественного оксида (ЕО) при облучении. Проанализирован механизм «дефектного насоса» в системе Si–ЕО при воздействии гиперзвуковых волн (ГВ). Изучено влияние ионов натрия на процесс распространения ГВ вдоль границы водная среда–твердое тело. Выполнены энергетические оценки с целью проверки непротиворечивости предложенных моделей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Д.И. Тетельбаум, Е.В. Курильчик, Ю.А. Менделева, // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2009, № 3, с. 94–103.
2. В.Л. Левшунова, Г. П. Похил, Д. И. Тетельбаум, // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2011, № 3, с. 1–4.
3. А.В. Степанов, Д.И. Тетельбаум, // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2017, № 7, с. 82–88.

НАНОКЛАСТЕРНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ В  
СТРУКТУРЕ МЕТАЛЛЛОВ ПО ДАННЫМ  
ПОЗИТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

К.М. Мукашев, А.Д. Мурадов, Ф.Ф.Умаров\*,  
Г.Ш. Яр-Мухамедова  
Казахский Национальный университет им.аль-Фараби  
(НИИЭТФ),  
\*Казахстанско-Британский технический университет  
г. Алматы, Казахстан

В работе экспериментально исследована дефектная структура металлов, подвергнутых протонной бомбардировке. Изучение профиля распределения дефектов по глубине прохождения заряженных частиц в трех различных материалах показало, что в нержавеющей стали и Мо, независимо от энергии протонов, возникают близкие по конфигурации вакансионные кластеры, восстанавливаемые в одну стадию отжига с энергией активации миграции  $E_a = 1.7 - 1.8$  эВ. Суммарная повреждаемость стали во всем интервале энергии протонов в основном определяется одним слабо выраженным упругим каналом, тогда как для молибдена она складывается из двух компонентов, в каждом из которых действует свой определенный механизм образования дефектов. Если для первоначально налетающих, высокоэнергетических протонов основным являются неупругий канал взаимодействий и возникновение субкаскадов, создаваемых ПВА значительной энергии, то для низкоэнергетических протонов важнейшими являются процессы упругого взаимодействия с атомами решетки и образования атомарного водорода в конце пробега. Основным механизмом образования радиационных дефектов в Та представляются явно выраженные упругие взаимодействия. Роль ядерных реакций в процессе создания структурных нарушений здесь выражена слабо. Дефекты, созданные низкоэнергетическими протонами, отжигаются в одну стадию, тогда как следствием воздействия частиц высокой энергии является возникновение радиационных дефектов, восстанавливающихся в две стадии, имеющие вакансионную и кластерно - дислокационную структуры.

## ВЛИЯНИЕ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ ИОНОВ КСЕНОНА НА ПРОНИКНОВЕНИЕ И ДЕФЕКТОБРАЗОВАНИЕ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ В КРЕМНИЙ

Ю.В. Балакшин<sup>1)</sup>, А.А. Шемухин<sup>1)</sup>, А.В. Кожемяко<sup>2)</sup>, В.С. Черныш<sup>1,2)</sup>, S. Petrovic<sup>3)</sup>, M. Erich<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> НИИЯФ им. Скобелевца, Москва, Россия

<sup>2)</sup> Физический факультет МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3)</sup> Институт ядерных наук Винча, Белград, Сербия

Проведены эксперименты по облучению монокристаллов кремния ионами ксенона в однозарядном и многозарядном состояниях. Ионы имплантировались с энергией в диапазоне от 50 до 400 кэВ. Доза облучения варьировалась от  $5 \cdot 10^{14}$  до  $5 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>.

С помощью метода резерфовского обратного рассеяния в сочетании с каналированием показано, что средние проективные пробеги внедренных многозарядных ионов (рис.1) имеют меньшие значения по сравнению с пробегами однозарядных ионов. Экспериментальные данные сравнены с результатами моделирования с применением кодов TRIM и MARLOWE. В работе обсуждается, различие профилей радиационно-стимулированных дефектов в случае однозарядных и многозарядных ионов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-32-00833мол\_а

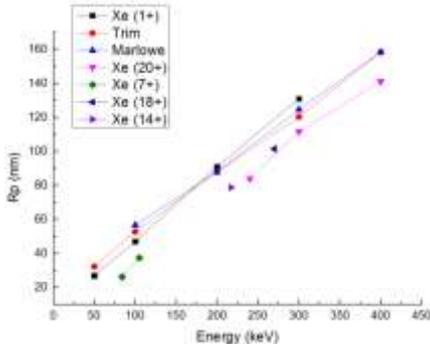


Рисунок 1. Средние проективные пробеги ионов ксенона в кремнии

КОГЕРЕНТНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВЕЛИЗИ ОСИ  
ПУЧКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ГЕОМЕТРИИ  
РАССЕЯНИЯ БРЭГГА

С.В. Блажевич, К.С. Люшина, А.В. Носков  
Белгородский государственный университет,  
Белгород, Россия

В рамках двухволнового приближения динамической теории дифракции, в геометрии рассеяния Брэгга, рассматривается когерентное рентгеновское излучение в направлении близком к оси пучка релятивистских электронов, пересекающих монокристаллическую пластинку. Получены выражения, описывающие спектрально-угловую плотность параметрического рентгеновского излучения вперед (ПРИВ), переходного излучения (ПИ) и их интерференционное слагаемое. Выражения получены для общего случая асимметричного отражения поля электрона по отношению к поверхности мишени. Показано существенное влияние расходимости электронного пучка и асимметрии отражения на спектрально-угловые характеристики когерентного рентгеновского излучения. Показано, что одна из ветвей ПРИВ имеет положительную, а другая отрицательную групповую скорость рентгеновских волн. Показано, что вклад различных ветвей ПРИВ в суммарное излучение зависит от асимметрии отражения.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 3.4877.2017/ВУ).

КОГЕРЕНТНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПУЧКА  
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ, ПЕРЕСЕКАЮЩИХ  
СОСТАВНУЮ МИШЕНЬ «АМОРФНЫЙ СЛОЙ-ВАКУУМ-  
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЙ»

С.В. Блажевич, Р.А. Загороднюк, А.В. Носков,  
О.Ю. Шевчук

Белгородский государственный университет,  
Белгород, Россия

Развита теория когерентного рентгеновского излучения пучка релятивистских электронов, пересекающих составную мишень аморфный слой-вакуум-монокристаллических слоев. Рассматривается геометрия, при которой монокристаллический слой отражает фотоны параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) и дифрагированного переходного излучения (ДПИ) в геометрии рассеяние Брэгга. В рамках динамической теории дифракции рентгеновских волн в монокристалле получены выражения, описывающие спектрально-угловые характеристики ПРИ, ДПИ и их интерференцию. Показана возможность существенного увеличения спектрально-угловой плотности ДПИ за счет суммарного вклада в него волн переходных излучений от аморфного слоя и передней границы монокристаллического слоя в условиях их конструктивной интерференции. Показана существенная зависимость угловой плотности ДПИ от расходимости электронного пучка.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-12-10019).



**Секция 4**

**МОДИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ  
СЛОЕВ ИОННЫМИ И ЭЛЕКТРОННЫМИ  
ПУЧКАМИ (ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ И РАДИАЦИОННО-  
ИНДУЦИРОВАННЫЕ ЭФФЕКТЫ, ДИАГНОСТИКА).**



## ИЗМЕНЕНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК С ПОМОЩЬЮ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Е.А. Воробьева<sup>1)</sup>, А.А. Шемухин<sup>1)</sup>, К.Д. Кушкина<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup> Физический факультет МГУ, Москва, Россия

Использование уникальных по своим физическим свойствам углеродных нанотрубок (УНТ) в различного рода электронных устройствах и функциональных материалах сегодня затруднено. Синтезировать нанотрубки с определенным набором физических характеристик довольно сложно, чаще всего используют дополнительные методики после синтеза.

Одним из методов, позволяющих модифицировать структуру уже синтезированных многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) и изменять их физические свойства, является ионное облучение. В отличие от механических и химических методов ионное облучение осуществляется в вакууме и не оставляет побочных включений. Модификация структуры при ионном воздействии выражается в последовательном воздействии на поверхностные слои нанотрубок путем образования дефектов в приповерхностных слоях  $sp^2$  углеродной кристаллической решетки.

Поверхность влияет на характер взаимодействия нанобъекта с внешней средой (растворимость, гидрофильность / гидрофобность, образование связей с полимерной матрицей в композите, а также на механизм переноса энергии через нее). При этом стабильность физических свойств исходных МУНТ делают этот материал привлекательной и удобной основой для дальнейших нанотехнологических процессов. На этом основано огромное поле применений МУНТ, включая диоды, биосенсоры, фильтры, суперконденсаторы и т.д.

Эта работа направлена на модификацию многостенных углеродных нанотрубок с помощью ионного облучения и изучение влияния этой модификации на смачиваемость массива УНТ.

ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ  
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ КРЕМНИЯ ПОД  
ОБЛУЧЕНИЕМ ПУЧКАМИ ИОНОВ ГЕЛИЯ И АРГОНА СО  
СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИЕЙ 10 КЭВ

Н.В.Волков, И.В.Олейников, Н.В.Сысоева, В.П.Самойлов  
Национальный Исследовательский Ядерный Университет  
«МИФИ», Москва, Россия

Как известно при модифицировании материалов ионными пучками развитие рельефа поверхности может существенно влиять на результаты последующих технологических операций, например, структуру и адгезию напыленных на подложку пленок, их электрофизические свойства.

В этой связи было изучены закономерности изменения рельефа поверхности пластин монокристалла кремния марки КЭФ 4,5 с кристаллографической ориентацией (111).

Облучение пучками ионов  $\text{He}^+$ ,  $\text{Ar}^+$  и  $\text{He}^+ + \text{Ar}^+$  ( $C_{\text{He}} : C_{\text{Ar}} = 1 : 1$  и  $2 : 1$ ) выполнено на установке ВОКАЛ, формирующей пучок ионов с широким непрерывным гауссоподобным энергетическим спектром со средней энергией 10 кэВ при температуре облучения  $<50^\circ\text{C}$  в интервале доз  $\Phi = (0,5-5) \times 10^{18}$  ион/ $\text{cm}^2$ , давление остаточных газов  $<1 \times 10^{-7}$  Торр.

Исследование рельефа и состояния поверхности образцов изучалось с помощью профилографа-профилометра TR-200 (порог чувствительности 1 нм) и растровых электронных микроскопов Quanta 500.

Установлено, что при облучении образцов пучками ионов  $\text{He}^+$  и  $\text{Ar}^+$  с широким энергетическим спектром формируется рельеф поверхности с шероховатостью  $R_a < 0,1$  мкм. При совместном облучении ионами  $\text{He}^+ + \text{Ar}^+$  ( $C_{\text{He}} : C_{\text{Ar}} = 1 : 1$  и  $2 : 1$ ) выявлено, что с ростом содержания ионов  $\text{He}^+$  субшероховатость возрастает, что, по-видимому, связано с наличием механических напряжений и особенностями формирования дислокационной структуры в модифицированном слое.

ТРЕКОВАЯ МОДИФИКАЦИЯ НАНОКОМПОЗИТА  $\text{SiO}_2\langle\text{Zn}\rangle/\text{Si}$   
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ ИОНАМИ Хе

Ф.Ф. Комаров<sup>1)</sup>, М.А. Моховиков<sup>1)</sup>, Л.А. Власукова<sup>2)</sup>,  
О.В. Мильчанин<sup>1)</sup>, В.А. Скуратов<sup>3)</sup>, А. Janse van Vuuren<sup>4)</sup>,  
J.N. Neethling<sup>4)</sup>, J. Żuk<sup>5)</sup>, И.Н. Пархоменко<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» БГУ, Минск, Беларусь

<sup>2)</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>3)</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>4)</sup> Centre for High Resolution Transmission Electron Microscopy, Nelson Mandela Metropolitan University, Port Elizabeth, South Africa

<sup>5)</sup> Maria Curie-Skłodowska University, Lublin, Poland

В слое  $\text{SiO}_2$  методом высокодозной имплантации синтезированы нанокластеры Zn. Проведены структурные и оптические исследования структурных перестроек наноконкомпозита после облучения ионами Хе (200 МэВ,  $2 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>). Постимплантационный отжиг и облучение быстрыми ионами приводят к упорядочению и удлинению нанокластеров цинка вдоль направления падающего ионного пучка (см. Рис. 1). Для образцов  $\text{SiO}_2\langle\text{Zn}\rangle/\text{Si}$ , облученных ионами Хе, зарегистрирована интенсивная фотолюминесценция в видимой области с максимумами на 425 и 570 нм.

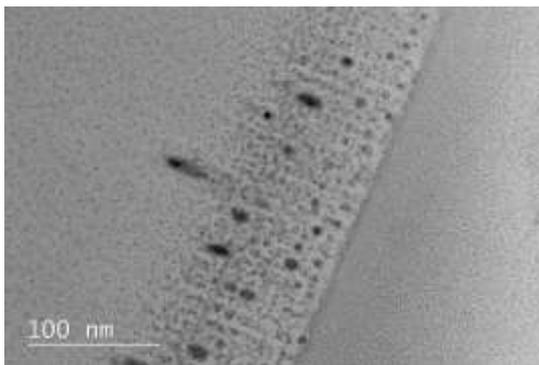


Рис.1 Микрофотография в режиме «cross-section» наноконкомпозита  $\text{SiO}_2\langle\text{Zn}\rangle/\text{Si}$ : после облучения ионами Хе

ОБЛУЧЕНИЕ БЫСТРЫМИ ИОНАМИ Хе КРЕМНИЯ И  
ДИОКСИДА КРЕМНИЯ С НАНОКЛАСТЕРАМИ InAs

Ф.Ф. Комаров<sup>1)</sup>, Н.С. Нечаев<sup>2)</sup>, И.Н. Пархоменко<sup>2)</sup>,  
О.В. Мильчанин<sup>1)</sup>, Л.А. Власукова<sup>2)</sup>, В.А. Скуратов<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Институт прикладных физических проблем им.  
А. Н. Севченко БГУ, Минск, Беларусь

<sup>2)</sup> Белорусский государственный университет,  
Минск, Беларусь

<sup>3)</sup> Объединенный институт ядерных исследований,  
Дубна, Россия

Приведены результаты исследований структурных и оптических свойств нанокластеров InAs, сформированных методом ионной имплантации, в матрицах кремния и диоксида кремния. Обнаружено влияние термообработки при температуре 900 °С и облучения ионами Хе с энергией 167 МэВ флюенсом  $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$  на структуру и фотолюминесценцию сформированных систем. Установлено, что облучение ионами Хе ослабляет фотолюминесценцию системы «InAs в Si» в ближнем ИК диапазоне. В случае системы «InAs в SiO<sub>2</sub>», облучение ионами Хе приводит к усилению интенсивности и уширению спектра люминесценции в видимой области спектра (550–750 нм). Обнаружено упорядочение нанокластеров и их вытягивание вдоль траектории ионов Хе в матрице SiO<sub>2</sub> (см. Рис.1).

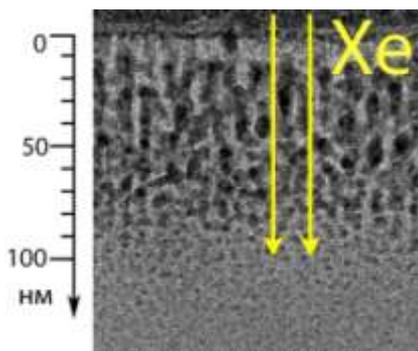


Рис.1 ПЭМ-микротография поперечного сечения системы «InAs в SiO<sub>2</sub>» после термообработки и облучения быстрыми ионами Хе.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШЕГО АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВОГО  
СПЛАВА 1421

И.А. Бушкевич<sup>1)</sup>, Е. Wendler<sup>2)</sup>, В.Г. Шепелевич<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский госуниверситет, Минск, Беларусь,

<sup>2)</sup> Университет им. Ф. Шиллера, Йена, Германия

В настоящее время с целью улучшения свойств материалов авиакосмической промышленности активно проводится поиск современных методов модифицирования структуры алюминий-литиевых сплавов. Поэтому использование методов сверхбыстрой закалки из расплава (СБЗР) представляет научный и практический интерес как для улучшения физико-механических свойств сплава 1421 системы Al-Mg-Li-Zr-Sc, так и разработки новых сплавов для эксплуатации при повышенных температурах.

В настоящей работе элементный состав и распределение элементов по глубине быстрозатвердевших фольг сплава 1421, полученных при скорости охлаждения  $10^6$  К/с, изучены методом РОР, используя ионы  $\text{He}^+$  и  $\text{H}^+$  с энергиями 2,5 МэВ и 1,4 МэВ соответственно. Содержание Li в образцах определялось с помощью ядерной реакции  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$  при энергии протонов 1,4 МэВ. Микроструктура фольг была также исследована методом растровой электронной микроскопии с использованием рентгеноспектрального микроанализа (РСМА).

Установлено, что в приповерхностных слоях образцов содержание Mg и Li выше, чем в объеме, превышая их расчетную концентрацию в сплаве. Данные РСМА о распределении элементов по поверхности и глубине фольг согласуются со спектрами РОР. Полученные результаты указывают на диффузию атомов Mg и Li на поверхность фольг при СБЗР, где они вступают в реакцию с кислородом и углеродом, образуя оксид MgO и соединение  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . При анализе влияния высокоскоростной кристаллизации на микроструктуру сплава 1421 оригинальные результаты сравниваются с данными распределения компонентов по глубине в ультрамелкозернистых образцах сплава после импульсной лазерной обработки.

## МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВОВ Al-Fe ВЫСОКО- И ГИПЕРСКОРОСТНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ

И.И. Ташлыкова-Бушкевич<sup>1)</sup>, Ю.С. Яковенко<sup>2)</sup>

- <sup>1)</sup> УО «Белорусский госуниверситет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь,  
<sup>2)</sup> УО «Минский государственный профессионально – технический колледж легкой промышленности и бытового обслуживания населения», Минск, Беларусь

Расширение границ применения сплавов на основе системы Al-Fe может быть достигнуто путем изменения физических характеристик их поверхностей. Одними из перспективных методов для получения алюминиевых сплавов с заданными физическими свойствами выступают методы высокоскоростной кристаллизации (технологии сверхбыстрой закалки из расплава (СБЗР)) и гиперскоростной кристаллизации (вакуумные методы модификации поверхности покрытий, в том числе ионно-ассистированное осаждение покрытий (ОПАСИ)).

В настоящей работе, используя резерфордовское обратное рассеяние ионов гелия, сканирующую зондовую и растровую электронную микроскопию и метод покоящейся капли, выполнен сравнительный анализ структуры и свойств поверхности быстрозатвердевших (БЗ) фольг и тонких пленок сплавов Al-Fe в зависимости от условий их формирования методами СБЗР и ОПАСИ с целью управления свойствами поверхностей металлических пленок.

В результате выполненных исследований показана возможность управления структурно-фазовым составом и смачиваемостью поверхности наноразмерных структур БЗ фольг и тонких металлических пленок Al – Fe в широком диапазоне скоростей охлаждения от  $10^6$ - $10^8$  К/с при сверхбыстрой закалке из жидкой фазы до  $10^{12}$ - $10^{13}$  К/с (скорость охлаждения каскадов атомных столкновений) при ионно-ассистированном нанесении пленок на стекло.

ПОСЛОЙНЫЙ АНАЛИЗ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ Si-O-Al  
СТРУКТУР МЕТОДАМИ ВТОРИЧНО-ИОННОЙ МАСС-  
СПЕКТРОМЕТРИИ И РЕЗЕРФОРДОВСКОГО ОБРАТНОГО  
РАССЕЯНИЯ

В.И. Бачурин, Н.С. Мелесов, А.А. Мироненко, Е.О. Паршин, А.С.  
Рудый, С.Г. Симакин, А.Б. Чурилов  
Ярославский филиал Физико-технологического института РАН,  
Ярославль, Россия

В настоящее время пленки Si-O-Al рассматриваются, как альтернатива углеродным, в качестве электродов в литий-ионных аккумуляторах. В работе [1] приведены результаты изучения физико-химических свойств Si-O-Al композитных слоистых пленок, полученных магнетронным распылением Si и Al мишеней в атмосфере Ar с незначительным содержанием O<sub>2</sub>, и их связи с электрохимическими характеристиками при использовании таких структур в качестве отрицательного электрода. В частности, с помощью рентгеновского микроанализа получено интегральное содержание элементов в пленках, хотя ожидается, что электрохимические свойства во многом определяются их пространственным распределением по глубине. Целью данного исследования является разработка методики количественного послойного анализа тонкопленочных композитных слоистых структур Si-O-Al с различным содержанием Al в слоях.

В докладе представлены результаты анализа четырехслойных пленок Si-O-Al, с повышенным содержанием Al в нечетных от подложки (Ti и Si) слоях. Эксперименты проводились на установках ВИМС (TOF.SIMS 5) и POP (K2MV). Данные ВИМС позволили качественно оценить соотношение содержания Si и Al в различных слоях и построить концентрационные профили распределения элементов в пленках после обработки спектров POP с помощью программы SIMNRA.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. T.L. Kulova, A.A. Mironenko, A.M. Skundin, A.S. Rudy, V.V. Naumov, D.E. Pukhov // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2016, v. 11, p. 1370

## МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ НАНОРАЗМЕРНОГО КРЕМНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИОННЫХ ПУЧКОВ

А.В. Кожемяко<sup>1)</sup>, А.П. Евсеев<sup>1,2)</sup>, А.А. Шемухин<sup>2)</sup>

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

<sup>1)</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики  
имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

Наноструктурированный кремний и кремниевые нанонити обладают необычными свойствами, благодаря которым такие структуры могут использоваться в оптоэлектронике, фотонике, фотовольтонике, тераностике, в устройствах для хранения энергии, для создания биосенсоров. В ряде работ показано, что с помощью ионного облучения можно эффективно управлять свойствами кремниевых наноматериалов. Поскольку в случае наноструктур могут проявляться низкоразмерные эффекты, и присутствует резкая граница раздела, их свойства (радиационная стойкость, профили распределения дефектов и примесей, магнитные свойства) после облучения могут значительно отличаться свойств массивных образцов.

В данной работе было изучено влияние облучения на диаметр кремниевых нанонитей. Анализ спектров комбинационного рассеяния показал наличие в поверхностном слое кристаллической и аморфной фаз вещества. Исследование структуры полученных образцов проводилось при помощи сканирующей электронной микроскопии. Спектры Резерфордского обратного рассеяния демонстрируют профили внедренных ионов и примесей, образовавшихся в процессе получения структуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-01040

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДИСЛОКАЦИОННОЙ  
ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННОМ  
КРЕМНИИ, ДОПОЛНИТЕЛЬНО ЛЕГИРОВАННОМ  
АКЦЕПТОРНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

Д.С. Королев<sup>1</sup>, А.Н. Михайлов<sup>1</sup>, А.И. Белов<sup>1</sup>,  
А.А. Никольская<sup>1</sup>, А.Н. Терещенко<sup>1,2</sup>, Э.А. Штейнман<sup>2</sup>,  
Д.И. Тетельбаум<sup>1</sup>, С.Н. Нагорных<sup>1</sup>, В.И. Павленков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия

Исследование формирования и последующей модификации центров дислокационной люминесценции (ДЛ) в кремнии, облученном ионами  $Si^{+}$  с последующим отжигом, является перспективным в силу возможности потенциального применения в оптоэлектронике и волоконной оптике. Однако, интенсивность ДЛ значительно уменьшается с повышением температуры выше 20 К. Одним из способов управления параметрами центров ДЛ может служить дополнительная ионная имплантация с последующей термообработкой. В работе исследуется зависимость интенсивности и положения линии D1 ДЛ от режимов имплантации ионов акцепторных примесей бора и галлия. Впервые установлено, что облучение галлием не приводит к усилению ДЛ, тогда как имплантация ионов бора приводит к существенному снижению температурного гашения и появлению на температурной зависимости дополнительного максимума при 60-80 К. Использование процедуры внешнего геттерирования позволило дополнительно улучшить температурную зависимость ДЛ и обеспечить сдвиг максимума в область ~ 100 К. Рассчитана система энергетических уровней и электронных переходов, описывающих температурную зависимость линии D1 ДЛ.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (№ 16.2737.2017/4.6), а также частично при поддержке РФФИ (№ 17-02-01070) и стипендии Президента РФ (СП-1147.2018.3).

ОБРАЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КАРБИДЕ  
КРЕМНИЯ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ ПРОТОНОВВ.В. Козловский<sup>1</sup>, А.Э. Васильев<sup>1</sup>, П.А. Карасев<sup>1</sup>, А.А. Лебедев<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 РАН, 194021,  
Санкт-Петербург, Россия

Проведено экспериментальное исследование процесса компенсации слаболегированных образцов n- и p-4H-SiC, выращенных методом газофазной эпитаксии, при облучении протонами с энергией 8 и 15 МэВ. Измерены скорости удаления носителей заряда. Установлено, что концентрация свободных носителей в карбиде кремния обоих типов проводимости падает линейно с ростом дозы облучения вплоть до полной компенсации. Полученные результаты указывают на то, что основным механизмом процесса является переход носителей на глубокие центры, связанные с образующимися при облучении простейшими радиационными дефектами, или их комплексами.

Путем компьютерного моделирования индивидуальных каскадов смещений рассмотрены особенности генерации пар Френкеля в SiC при торможении протонов с энергиями от 7 до 22 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. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных и получены оценки размеров зоны спонтанной рекомбинации.

ИОННО-ТРЕКОВАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПЛЕНКИ ДИОКСИДА  
КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННОЙ ЦИНКОМ И  
ОТОЖЖЕННОЙ В КИСЛОРОДЕ

В.В. Привезенцев<sup>1)</sup>, В.А. Скуратов<sup>2)</sup>, В.С. Куликаускас<sup>3)</sup>, В.В. Затекин<sup>3)</sup>, А.В. Макунин<sup>3)</sup>, Э.А. Штейнман<sup>4)</sup>,  
А.Н. Терешенко<sup>4)</sup>, А.Н. Палагушкин<sup>5)</sup>  
<sup>1)</sup>ФТИАН РАН, Москва, Россия  
<sup>2)</sup>ОИЯИ, Дубна, Московская обл., Россия  
<sup>3)</sup>НИИЯФ МГУ, Москва, Россия  
<sup>4)</sup>ИФТТ РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия  
<sup>5)</sup>ФНЦ “НИИСИ РАН”, Москва, Россия

Представлены результаты модификации свойств пленки SiO<sub>2</sub>, имплантированной цинком и отожженной в кислороде, после облучения быстрыми ионами ксенона.

Пленки SiO<sub>2</sub> толщиной 170нм, термически выращенные на подложке n-Si (100) в атмосфере сухого кислорода, были имплантированы <sup>64</sup>Zn<sup>+</sup> с дозой 5×10<sup>16</sup>/см<sup>2</sup> и энергией 50кэВ при температуре 20°С. Затем образцы были окислены в течение 1ч в диапазоне температур 400-1000°С. После отжига при 700°С образцы были облучены под углом 45° к поверхности ионами <sup>132</sup>Xe<sup>26+</sup> с энергией 167МэВ в диапазоне флюенсов 1×10<sup>12</sup> – 5×10<sup>14</sup>/см<sup>2</sup>.

Для исследования образцов использовались методы растровой электронной микроскопии в сочетании с энерго-дисперсионным микроанализом, фотолюминесценции и оптической поляризационной рефлектометрии.

Обнаружено, что после имплантации в пленке SiO<sub>2</sub> образуются наночастицы (НЧ) Zn. После отжига при 700°С на спектре фотолюминесценции образуется пик на длине волны 370нм, обусловленный образованием НЧ фазы ZnO. Этот пик пропадает после отжига при 900°С, а образуется пик на длине волны 425нм, обусловленный фазой Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>.

Облучения ксеноном образцов, отожженных при 700°С, приводит к гашению линии фотолюминесценции на длине 370нм и образованию уширенного пика на длине 670нм, связанного с радиационными дефектами и их кластерами. После облучения ксеноном с флюенсом 5×10<sup>14</sup>/см<sup>2</sup> обнаружено изменение формы НЧ от сферической к эллипсоидальной.

## НОВЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ГНЦ РФ – ФЭИ

А.Ф. Гурбич

ГНЦ РФ – ФЭИ, Обнинск, Россия

Новый перезарядный электростатический ускоритель Tandetron™ 4130 MC+, изготовленный фирмой HVE (Голландия), находится в эксплуатации в Физико-энергетическом институте. Ускоритель оснащен двумя ионными источниками – дуоплазмотронным и распылительным для создания отрицательных ионов из газов, включая гелий, и твердых материалов. Потенциал кондуктора изменяется в пределах от 200 кВ до 3 МВ при высокой долговременной стабильности ( $\pm 300$  В) и низких пульсациях (200 В).

Ускоритель оборудован тремя ионопроводами – для анализа состава и структуры материалов, для имплантации ионов и для проведения нейтронно-физических исследований. Камера для имплантации позволяет проводить имплантацию ионов в широком диапазоне масс и при различных температурах образцов – от температуры кипения жидкого азота до 800 °С. Специальное сканирующее устройство обеспечивает высокую однородность облучения (неоднородность не более 2 %) по поверхности образца диаметром до 10 см. Камера для диагностики поверхности ионными пучками (IBA) используется для проведения анализа поверхности материалов методами обратного рассеяния (RBS и EBS), ядерных реакций (NRA) и по ядрам отдачи (ERDA). Мишенедержатель закреплен на подвижной платформе гониометра, который обеспечивает угловую и пространственную ориентацию мишени.

На ускорителе проводятся работы в интересах радиационного материаловедения, электронной промышленности и разработки новых технологий микроэлектроники.

В докладе приведены результаты исследования характеристик ускорителя, сделан обзор выполняемых на ускорителе работ.

ORTEC'S SPECIALTY AND CUSTOMIZED HPGE SOLUTIONS  
FOR RESEARCH FIELD

G. Geurkov  
AMETEK/ORTEC, Oak Ridge, USA

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ С ВЕРХНИМ  
СЛОЕМ ОКСИДА ГАФНИЯ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОМЕТРИИ  
ЯДЕРНОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

С.В. Савушкина<sup>1,2)</sup>, М.Н. Полянский<sup>1)</sup>, Н.В. Ткаченко<sup>3)</sup>, А.М.  
Борисов<sup>2,3)</sup>, В.Г. Востриков<sup>3)</sup>, А.И. Каменских<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Москва, Россия

<sup>2)</sup> МАИ, Москва, Россия

<sup>3)</sup> НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

Оксид гафния является привлекательным керамическим компонентом теплозащитного покрытия благодаря его сходству с диоксидом циркония и его повышенным температурам фазовых переходов. Однако, недостатком использования оксида гафния по сравнению с диоксидом циркония, остается меньший коэффициент теплового расширения (КТР).

Решением проблемы применения оксида гафния в качестве верхних слоев теплозащитного покрытия может быть создание градиентной структуры с постепенно изменяющимся КТР.

В данной работе проводили формирование и исследования покрытий толщиной до 100 мкм, полученных при плазменном напылении порошков NiCoCrAlY, NiCoCrAlY+ZrO<sub>2</sub>-7% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>-7% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>-7% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+HfO<sub>2</sub>-9% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и HfO<sub>2</sub>-9% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Структуру покрытий исследовали с помощью спектрометрии ядерного обратного рассеяния протонов (ЯОР) /1/ энергии 7,6 МэВ, растровой электронной микроскопии и рентгеновской дифракции.

Показано, что при напылении сверхзвуковыми скоростями порошков NiCoCrAlY, ZrO<sub>2</sub>-7% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и HfO<sub>2</sub>-9% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для покрытий характерна трехслойная структура с наличием на границах основных слоев переходных зон толщиной до 5 мкм. При напылении дополнительных переходных слоев смешанного состава структура керамического слова представляет собой единый слой с плавным переходом к связующему металлическому слою.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (грант № МК 524.2017.8).

ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалова О.В., Борисов А.М., Востриков В.Г. и др.// Ядерная физика. 2009. Т. 72. С. 1721.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ДЕЙТЕРИЯ,  
ИМПЛАНТИРОВАННОГО В БЕРИЛЛИЙ, МЕТОДОМ  
ЭЛЕКТРОННОГО RBS

В.П. Афанасьев<sup>1)</sup>, А.С. Грязев<sup>1),2)</sup>, П.С. Капля, М. Köppen<sup>3)</sup>,  
О.Ю. Ридзель<sup>1),4)</sup>, Н.Ю. Субботин<sup>1)</sup>  
<sup>1)</sup>НИУ «МЭИ», Москва, Россия  
<sup>2)</sup>АО «ВНИИНМ», Москва, Россия  
<sup>3)</sup>Berlin, Germany  
<sup>4)</sup>TU Wien, Vienna, Austria

Рассматриваемый в настоящей работе метод анализа содержания изотопов водорода (спектроскопия пиков упруго отраженных электронов, EPES) называют электронным RBS, сравнивая его с известным методом анализа поверхности, основанным на процессе рассеяния легких ионов. Метод EPES может быть реализован на установках, обладающих высоким энергетическим разрешением, при выполнении критерия Релея /1/. Информационную глубину предлагаемого метода определяет как средняя длина неупругого пробега электрона между двумя соударениями  $l_{in}$ , так и геометрия рассеяния. Послойный анализ можно выполнять, меняя геометрию эксперимента /2/.

Величина  $l_{in}$  растет с ростом энергии зондирующего пучка  $E_0$  по закону  $l_{in} \sim E_0^{0,8}$ . Определяя среднее содержание изотопа водорода в слое порядка  $l_{in}$  при разных значениях энергии зондирующего пучка  $E_0$ , можно определить послойный профиль интересующего нас изотопа водорода.

В работе реализован метод энергетического сканирования мишеней ( $E_0 \sim 1,5-5$  кэВ). Разработанная методика позволила определить рекордно низкое содержание D (на уровне 20 %). Данный уровень концентрации D характерен для поверхностных слоев Be, обращенного к плазме в термоядерных реакторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Kaplya P.S., Köppen M., Ridzel O.Yu., Subbotin N.Yu., Hansen P. // J. Phys.: Conf. Ser., 2017, v. 891, p. 012303.
2. Афанасьев В.П., Костановский И.А. // Вестник МЭИ, 2012, №4, с. 72.

## О МИНИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ, НЕОБХОДИМОЙ АТОМУ ВОДОРОДА ДЛЯ ПРОНИКНОВЕНИЯ ВНУТРЬ ФУЛЛЕРЕНА

И.Д. Ядгаров<sup>1)</sup>, В.Г. Стельмах<sup>1)</sup>, А.А. Джурахалов<sup>2)</sup>  
<sup>1)</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий,  
Ташкент, Узбекистан

<sup>2)</sup>University of Antwerp, Antwerp, Belgium

Молекулярная модель фуллера  $C_{60}$ , состоящая из 60 атомов углерода с соответствующим пространственным расположением, строилась с помощью программы на Фортране. Далее модель графена прошла процесс дампирования (введения сил взаимодействия при  $T=0$  К) и процесс термализации дампированной структуры, в результате чего модель графена «разогрели» до 300 К. Для описания межатомного взаимодействия во всех расчетах использовался потенциал Бреннера второго поколения (REBO), который хорошо описывает углеродные структуры и их взаимодействия с атомами водорода [1].

Искомую минимальную кинетическую энергию  $E_{\min}$ , необходимую для проникновения атома водорода внутрь фуллера  $C_{60}$ , определяли путем компьютерного моделирования нормального падения атомов водорода с энергиями от 0.1 до 1.2 электрон-вольт (эВ) с шагом 0.1 эВ и от 2 до 9 эВ с шагом 1 эВ на гексагоны или пентагоны фуллера. Значения  $E_{\min}$  равняется 3 эВ и 5 эВ в случае падения на гексагон и пентагон, соответственно. При энергиях меньших, чем  $E_{\min}$  атомы водорода отскакивают от фуллера или осаждаются на поверхность фуллера.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Brenner D.W., Shenderova O.A., Harrison J.A., Stuart S.J., Ni B., Sinnott S.B., //J. Phys: Condens. Matter, 2002, №14, С. 783.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В  
МОЛИБДЕНОВОЙ ПОДЛОЖКЕ ПОД ОБЛУЧЕНИЕМ ПУЧКОМ  
ИОНОВ  $\text{He}^+$  И  $\text{Ar}^+$  СО СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИЕЙ 10 И 20 КЭВ

Н.В. Волков, Д.А. Сафонов, А.С. Яшин, Е.Л. Корневский,  
Х.А. Халед Абдуллах

Национальный Исследовательский Ядерный Университет  
«МИФИ», Москва, Россия

Одним из эффективных методов модифицирования поверхности различных материалов является легирование подложки с помощью выбитых атомов из предварительно напыленных пленок под облучением ионами инертных газов (метод ионного перемешивания).

В работе рассмотрены условия внедрения атомов Al, Fe, Cu, W в монокристаллическую подложку Mo под облучением ионами  $\text{He}^+$  и  $\text{Ar}^+$  в интервале энергий 0,2–10 кэВ. Проведены эксперименты на установке ИЛУР-03 которая генерирует радиальный пучок ионов  $\text{He}^+$  и  $\text{Ar}^+$  с энергетическим спектром в интервале энергий 0,5–5,0 кэВ. Доза облучения изменялась в интервале величин  $(1-5) \times 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>. Пленки толщиной 40–50 нм напылялись на подложки магнетронами. Изучение распределения внедренных атомов проведено на установке РНИ 660 (USA).

Оценка ожидаемых распределений  $C(x)$  внедренных атомов выполнено в рамках линейного приближения с помощью программного пакета SRIM 2008.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что при облучении однослойных пленок их атомы внедряются в подложку на глубины до 0,4 мкм. При этом максимальная глубина внедрения  $X_m$  зависит от скорости распыления, времени облучения и хорошо согласуется с расчетами.

В случае распыления двухслойных пленок зависимость  $C(x)$  имеет несколько максимумов, а максимальная глубина внедрения  $X_m$  зависит также от физико-химического взаимодействия и изменяется более сложным образом.

ОБ ОБРАЗОВАНИИ ПЛЕНОК СИЛИЦИДОВ МЕТАЛЛОВ (Li, Na, K, Cs, Rb, Ba) ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ В Si И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ТЕРМИЧЕСКОМ ОТЖИГЕ

А.С. Рысбаев, И.Р. Бекпулатов, Ж.Б. Хужаниёзов

Ташкентский государственный технический университет,  
г.Ташкент, Узбекистан, [rysbaev@mail.ru](mailto:rysbaev@mail.ru)

В работе методом электронной оже-спектроскопии исследовано формирование силицидных пленок Li, Na, K, Cs, Rb, Ba в процессе имплантации ионов металлов с различной энергией и дозой облучения в монокристаллы кремния. Показано, что в результате такой ионной имплантации и последующего отжига в приповерхностной области Si образуются пленки следующих силицидов: LiSi, KSi, RbSi, CsSi, NaSi и BaSi.

Авторы предлагают для получения силицидных пленок использовать низкоэнергетическую (до 5 кэВ) и высокодозную ( $D > 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) ионную имплантацию и последующий кратковременный термический прогрев при температуре, близкой к температуре образования силицидных соединений.

Целью данной работы является детальное изучение кинетики образования тонких наноразмерных пленок силицидов Li, K, Na, Rb, Cs и Ba при их ионной имплантации в Si (111). Процесс силицидообразования авторами контролируется методом ЭОС - по изменению энергии и формы оже - пика  $\text{Si}_{L_{2,3}}VV$  и по появлению новых сверхструктур на катринах ДМЭ.

Экспериментальные измерения толщины пленок силицидов показали, что она растет с уменьшением массы имплантируемых ионов, при фиксированной энергии ионов она также растет с увеличением дозы примерно, как  $D^{1/2}$  (рис. 1).

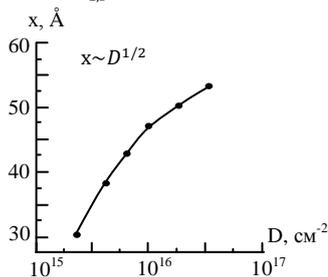


Рис. 1. Зависимости толщин силицид-ных пленок  $x$  от дозы ионов  $D$ .

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ В Si НА  
ФОРМИРОВАНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ В  
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ  $Mn_4Si_7-Si<Mn>-Mn_4Si_7$  и  $Mn_4Si_7-$   
 $Si<Mn>-M$

Т.С. Камилов<sup>1</sup>, В.В. Ключковская<sup>2</sup>, А.С. Орехов<sup>2</sup>, А.С. Рысбаев<sup>1</sup>,  
Б.Д. Игамов<sup>1</sup>  
Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан  
Институт кристаллографии РАН, Москва, Россия

В данной работе приводятся результаты исследования влияния структурных дефектов в кремнии на формирование фоточувствительных свойств в гетерофазных структурах в процессе диффузионного легирования марганцем. Были изготовлены две партии образцов кремния КДБ-10: сильно дефектные образцы – а и малодефектные – б. Диффузия Mn в Si проводилась из газовой фазы при температуре  $1040 \div 1070^\circ\text{C}$  в течение 40 – 60 мин. в условиях вакуума в кварцевой ампуле.

Было установлено, что гетероструктуры первой партии образцов - а легированных марганцем обладали высокими фотоэлектрическими свойствами. В образцах второй партии фотоэлектрические явления отсутствовали. Исследования образцов партии а показало, что толщина переходной области между ВСМ и Si<Mn> составляет не менее 20 нм и является аморфной кремниевой прослойкой. Для второй б партии на границе раздела пленка ВСМ/подложка (Si<Mn>) отсутствует переходной слой. Таким образом в процессе диффузионного легирования кремния Mn нарушенные слои на поверхности кристаллов углубляют вхождение атомов Mn, облегчают адсорбцию, растворение и диффузию Mn в объем Si, а также способствует образованию аморфного слоя на границе раздела ВСМ и Si<Mn>. Наличие такого аморфного переходного слоя способствует протеканию ударной ионизации носителей тока при приложении внешнего напряжения, а также на формирование фотоэлектрических явлений.

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ИОННО-ОБЛУЧЕННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ МЕТОДАМИ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Н.В. Волков, И.В. Олейников, Н.В. Сысоева, В.П. Самойлов  
Национальный Исследовательский Ядерный Университет  
«МИФИ», Москва, Россия

В настоящей работе представлены результаты изучения методами инфракрасной спектроскопии состояния ионномодифицированных приповерхностных слоев пластин монокристалла кремния марки КЭФ 4,5 с кристаллографической ориентацией (111).

Облучение проведено пучками ионов  $\text{He}^+$  и  $\text{Ar}^+$  на установке ВОКАЛ, формирующей пучок ионов с широким непрерывным гауссоподобным энергетическим спектром со средней энергией 10 кэВ, температура облучения  $<50^\circ\text{C}$ , доза  $\Phi = (0,5-5) \times 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>, давление остаточных газов  $<1 \times 10^{-7}$  Торр.

Измерение спектров отражения  $R(\lambda)$  и прохождения  $T(\lambda)$  в области длин волн 1–15 мкм проведено на спектрометре Nicolet 6700.

Анализ полученных результатов показал, что с ростом дозы облучения образцов формируются дополнительные линии, как на эмиссионном, так и на трансмиссионном спектрах в области длин волн 3–7 мкм. Наличие дополнительных линий, видимо, связано с образованием в модифицированном слое мелкодисперсных скоплений, которые стимулированы присутствием внедренных атомов газов.

При этом интенсивность выявленных линий оказывается выше для случая облучения ионами  $\text{He}^+$  по сравнению с облучением до тех же доз ( $\Phi \leq 2 \times 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>) ионами  $\text{Ar}^+$ .

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММЫ TRIM  
ПРОФИЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМОВ ПРИ  
ДУХПУЧКОВОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ В  
МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ МИШЕНИ

Г.А. Вершинин

Омский государственный университет им.

Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

В работе /1/ поверхность эквивалентного сплава TiNi была подвергнута двухпучковой имплантации ионами  $Ni^{+}$  и  $N^{+}$  с целью изучения элементного состава по глубине мишени и изменения физико-механических свойств материала. Первичное облучение ионами  $N^{+}$  проводили непрерывным пучком дозой  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  и энергией 60 кэВ, а вторичное - пучком ионов  $Ni^{+}$  вакуумно-дугового источника «Диана» дозой  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ , ускоряющим напряжением 60 кВ (средняя энергия пучка 98,4 кэВ). Обнаружено, что в результате двойной имплантации профиль ионов азота имеет два максимума: один вблизи поверхности, а второй пик расположен на глубине  $\approx 130 \text{ нм}$ , но с меньшей концентрацией. Целью данной работы являлось изучение возможностей программы TRIM /2/ для предсказания профилей распределения атомов, формирующихся при двухпучковой ионной имплантации.

На рис. 1. представлены модельные профили ионов азота после первичной (кривая 2) и вторичной (1) имплантации ионами  $Ni^{+}$  с параметрами эксперимента, что указаны выше. Модель качественно правильно предсказывает наблюдаемые закономерности.

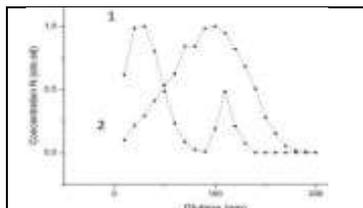


Рис.1. Концентрационные профили азота в сплаве Ti

ЛИТЕРАТУРА

1. Погребняк А.Д. и др.// ЖТФ, 2009, том 79, вып. 5, с. 65.
2. J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 2010, Vol.268, P.1818-1823.

ПОРОГОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА  
УПРУГОГО ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ОТ  
ПОВЕРХНОСТИ ПЛЁНКИ MgO,  
ИМПЛАНТИРОВАННОЙ ИОНАМИ Ba

Э. Раббимов, Г.Х. Аллаёрова, М.Б. Юсупжонова, Б. Е. Умирзаков,  
Д.А. Ташмухамедова  
Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан

Энергетическая зависимость коэффициента  $R$  упругого отражения электронов (УОЭ) в области малых значений энергии первичных электронов  $E_p$  для твердых тел (независимо от природы и кристаллического строения) характеризуется тонкой структурой. Немонотонность кривых  $R(E_p)$  в настоящее время объясняется главным образом уменьшением числа упруго отраженных электронов при переходе через порог неупругого взаимодействия и эффектом резонансного увеличения числа этих электронов перед порогом возбуждения плазменных колебаний.

В настоящей работе приведены результаты измерений коэффициентов упругого отражения медленных электронов от поверхности чистых и легированных ионами бария пленок MgO. Построена простая теория, объясняющая особенности энергетической зависимости коэффициента упругого отражения медленных электронов вблизи порогов неупругих каналов.

Легирование MgO ионами  $Ba^+$  приводит к росту величин коэффициентов ВЭЭ и к изменению тонкой структуры кривых  $\sigma(E_{pF})$ ,  $R(E_{pF})$  и  $\delta(E_{pF})$ , причем эти изменения для данной энергии ионов  $E_0$  зависят от дозы облучения. Отметим, что максимумы на кривой  $R(E_{pF})$  не могут быть обусловлены интерференцией когерентно рассеянных электронов, поскольку известно, что при  $N \geq 5 \cdot 10^{15}$  ион-см<sup>-2</sup> поверхность кремния сильно разупорядочивается, вплоть до аморфизации. Результаты электронной оже-спектроскопии показали, что при ионной бомбардировке в поверхностных слоях образца образуется химическое соединение кремния с Ba. Этим и объясняется появление новых особенностей на кривых  $R(E_{pF})$  ионно-легированного MgO.

ВЛИЯНИЕ БОМБАРДИРОВКИ ИОНОВ  $\text{Ag}^+$  НА СОСТАВ,  
СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПЛЕНОК  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ 

Б.Е. Умирзаков, Д.А. Ташмухамедова  
Ташкентский государственный технический университет, Ташкент,  
Узбекистан

Пленка  $\text{SiO}_2$ , получена термическим окислением Si (111) в атмосфере сухого кислорода при температуре  $\sim 1250$  К. Толщина пленки  $\text{SiO}_2$  составляла  $\sim 60$  нм. Перед ионной бомбардировкой пленки  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  (111) обезгаживались в высоком вакууме ( $10^{-6}$  Па) при  $T \approx 1200$  К в течении 4 – 5 часов.

Результаты ОЭС показали, что основные изменения оже-пика наблюдаются начиная с  $D \approx 5 \cdot 10^{14}$   $\text{см}^{-2}$ . При этом интенсивность основного пика  $\text{SiO}_2$  ( $E = 76$  эВ) немного изменяется и появляются мало интенсивный пик с  $E \approx 82$  эВ. С ростом дозы ионов до  $10^{15}$   $\text{см}^{-2}$  интенсивность основного пика уменьшается, а интенсивность пика с  $E \approx 82$  эВ увеличивается. При  $D = 5 \cdot 10^{15}$   $\text{см}^{-2}$  наряду с увеличением интенсивности пика  $E$  происходит некоторое (на 2 – 3 эВ) смещение его положения в сторону больших  $E$ . При  $D = 10^{16}$   $\text{см}^{-2}$  интенсивность пика  $E_1$  резко уменьшается и интенсивность пика  $E_2$  увеличивается и появляется пик  $E_3$  при  $E \approx 90 - 92$  эВ, характерный для “чистого” Si. При  $D \approx 5 \cdot 10^{16}$   $\text{см}^{-2}$  интенсивности пиков  $E_1$  и  $E_2$  уменьшается практически до нуля, а  $E_3$  увеличивается до максимума. При этом на поверхности формируется аморфная пленка Si с толщиной  $\sim 10 - 15$  Å.

После прогрева при  $T = 1000$  К в течение 30 мин. полностью устанавливается  $L_{23}VV$  оже-пик чистого кремния. При этом на спектре имеются очень слабые пики  $\text{SiO}_2$  и  $\text{SiO}_x$ , что может быть обусловлено выходом оже-электронов из приповерхностных слоев систем Si/SiO<sub>2</sub>. Дальнейшее увеличение энергии ионов  $\text{Ag}^+$  до 2 кэВ приводила к практическому сглаживанию этих пиков.

ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ  
ТОНКИХ ПЛЕНОК SiO<sub>2</sub>/Si

М.Б. Юсупжоннова, А.Т. Нурматов, Д.А. Ташмухамедова,  
Б.Е. Умирзаков  
Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан

В данной работе изучены зонно-энергетические параметры, оптические и эмиссионные свойства пленок SiO<sub>2</sub>/Si с толщиной  $\theta = 30 - 500 \text{ \AA}$ , а также состав и толщина переходного слоя образующегося на границе SiO<sub>2</sub> – Si /1, 2/.

В таблице приведены основные зонно-энергетические параметры ( $E_v$  – потолок валентной зоны,  $E_F$  – уровень Ферми,  $E_g$  – ширина запрещенной зоны,  $\chi$  – сродство к электрону) и максимальные значения коэффициента ВЭЭ ( $\sigma_m$ ) и коэффициента преломления света  $n$  при  $\lambda = 550 \text{ нм}$ .

Таблица. Зонно-энергетические параметры, эмиссионные и оптические свойства, измеренные на поверхности SiO<sub>2</sub> и на глубинах  $d_1$  и  $d_2$  переходного слоя ( $\theta_{SiO_2} = 60 \text{ \AA}$ )

Исследуемые образцы	$E_v$ , эВ	$E_F$ , эВ	$E_g$ , эВ	$\chi$ , эВ	$\sigma_m$	$n$
SiO <sub>2</sub>	9,1	4,7	8,6-8,8	0,3-0,5	1,8	1,45
SiO ( $d_1=50\text{\AA}$ )	6,0	–	4,5-5,0	1,0-1,5	1,25	1,95
Si ( $d_2=120 \text{ \AA}$ )	5,1	4,7	1,1	4,0	1,0	3,25

Измеренные на различных глубинах приграничной области системы SiO<sub>2</sub>/Si ( $\theta_{SiO_2} = 60 \text{ \AA}$ ). Видно, что значения  $E_g$  для SiO<sub>2</sub> составляет 8,9 эВ, а для SiO – 5 эВ. Таким образом, в переходном слое, образующемся на границе SiO<sub>2</sub>/Si с ростом глубины от 0 до 120  $\text{\AA}$  значения  $E_g$  монотонно уменьшаются от  $\sim 9 \text{ эВ}$  до  $\sim 1,1 \text{ эВ}$ .

ЛИТЕРАТУРА

1. Нормурадов М.Т., Умирзаков Б.Е., Ташатов А.К. // Поверхность. 1988, № 4. С. 73 – 78.
2. Эргашов Ё.С., Ташмухамедова Д.А., Раббимов Э. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015, № 4, с. 38 – 43.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ  
ПРИМЕСЕЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ПОЛУПРОВОДНИК –  
МЕТАЛЛ МЕТОДАМИ ЭОС и ВИМС

А.А. Абдувайитов, Х.Х. Болтаев, З.Р. Саидахмедова,  
Б.В. Ибрагимова

Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан

Полупроводниковые приборы часто выходят из строя из-за ухудшения контактной в результате его окисления, ухудшения адгезии контактной плёнки к подложке полупроводнику, загрязнения контакта, особенно под контактной областью, различными вредными химически активными примесями, элементами и т.д. /1, 2/.

Вакуум в камера электронного оже-спектрометра был получен системой без масляной откачки, а его уровень был в пределах  $(3 - 5) \cdot 10^{-9}$  Торр. Для получения Оже спектров исследуемого материала применен электростатический анализатор Юза – Рожанский.

Перед измерением система Al-Si очищалась прогревом при  $T = 850 - 900$  °С. Оже-спектры чистого Si и пленки Al, нанесенной на поверхность Si, толщиной  $\sim 1$  мкм. Поверхности чистого Si и Al обнаруживаются атомы примесных элементов (C, O, Ar), общая концентрация которых не превышает 1 – 1,2 ат.%. Дальнейшие исследования, проведенные с использованием ВИМС, показали, что в Si и Al наряду с указанными примесями содержится в малом количестве ряд неконтролируемых примесей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. М. Высшая школа 1987. 106 с.
2. Алиев А.А., Кодыров Т. //Узбекский физический журнал. 1998. №3. С.201.

РАЗРУШЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ  
АЛЮМООКСИДНОЙ КЕРАМИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ  
МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА НАНОСЕКУНДНОЙ  
ДЛИТЕЛЬНОСТИ

В.С. Ковивчак, Т.В. Панова  
Омский государственный университет  
им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

Остаточные напряжения, возникающие в материале после воздействия мощного ионного пучка (МИП) могут приводить к разрушению поверхностных слоев материала. Наиболее сильно это проявляется на хрупких материалах, к которым относится и алюмооксидная керамика (поликор).

В настоящей работе исследовано разрушение поверхностных слоев и изменение остаточных напряжений в поликоре (содержание  $Al_2O_3$  составляет  $\sim 99,7\%$ ), после воздействия МИП. Установлено, что при таком воздействии образуются трещины перпендикулярные и параллельные поверхности облучения. При исследовании трещин с помощью оптической микроскопии наблюдается образование интерференционной картины в отраженном свете, что свидетельствует об изгибе фрагментов разрушения (как и в случае натрий-силикатного стекла).

Рентгеноструктурный анализ показал отсутствие структурно-фазовых превращений вызванных облучением МИП, при этом наблюдается лишь изменение интенсивности отражений от различных рефлексов, которое зависит как от величины плотности тока пучка, так и числа импульсов облучения.) Оценка остаточных напряжений, проведенная рентгеновским методом, показала, что остаточные напряжения максимальны при однократном воздействии МИП с плотностью тока пучка  $150 \text{ A/cm}^2$  и быстро снижаются при увеличении числа импульсов облучения до 3. Уменьшение остаточных напряжений, по-видимому, связано с релаксацией последних при множественном образовании трещин в поверхностном слое поликора. Обсуждены возможные механизмы разрушения хрупких материалов при воздействии МИП.

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВА СВОБОДНЫХ ПЛЕНОК  
Si-Cu ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ИОНАМИ Ba<sup>+</sup>М.К. Рузибаева, З.Э. Мухтаров, Б.Е. Умирзаков,  
З.А. Исаханов, К.Г. ЭшбоевИнститут ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз,  
Ташкент, Узбекистан

В данной работе изучены влияния имплантации ионов Ba<sup>+</sup> на состав и структуры пленки Si с толщиной 50Å осажденный на поверхность свободной пленки Cu(100) толщиной 500Å [1]. Перед ионной бомбардировкой образец обезгаживался при T≈750K в течение 2-3 часа при вакууме не хуже P=10<sup>-6</sup> Па. Имплантация ионов проводилась с E<sub>0</sub>=1 кэВ при дозе D=4·10<sup>16</sup>см<sup>-2</sup>. Имплантация ионов Ba<sup>+</sup> приводил к следующим изменениям: поверхностная концентрация примесных атомов (O, C) уменьшается до 1 ат.%; концентрация Ba на поверхностном и приповерхностном слое до глубины 35-40Å составляет 40-45 ат.%; в интервале d≈40-100 Å уменьшения до 2-3 ат.%; в ионно-имплантированном слое частично образуется соединения типа Ba+Si. Эти изменения также приводит к некоторому изменению профили распределения атомов Cu в системе Si-CuSi<sub>2</sub>-Cu: глубина проникновения меди в кремний и Si в Cu увеличивался ~1,5 раза. Однако толщина слоя CuSi<sub>2</sub> практически не изменяется и составляет ~100Å. Постимплантационный отжиг начиная с T≈700K приводил к изменению профили распределение атомов и резкому изменению состава и структуры поверхностных слоев. На поверхности сформировано поликристаллическая пленка BaSi<sub>2</sub> с толщиной 50-60Å. Увеличение энергии ионов Ba<sup>+</sup> до 2 кэВ приводил к увеличению глубину диффузии Cu в Si. При этом на поверхности Si появляется малоинтенсивные оже-пики, характерные для Cu.

Сравнение этих данных с данными для толстых поликристаллических пленок Si показали, что они существенно отличается друг от друга. Например, глубина диффузии атомов Cu в Si в случае нанопленок составляет 250-300Å, а в случае толстых пленок – 150 - 200Å.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Б.Е. Умирзаков, З.А. Исаханов, М.К. Рузибаева, З.Э. Мухтаров, А.С. Халматов, ЖТФ, 2015, Т.85, №4, С.123-125.

ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ СТИМУЛЯЦИИ НА ИЗМЕНЕНИЕ  
УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ТОНКИХ  
УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ  
ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ГРАФИТА

Завидовский И. А., Стрелецкий О.А.  
Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова

В работе представлены результаты исследования тонких углеродных пленок, изготовленных методом импульсно-плазменного распыления графита в атмосфере смеси газов аргона и азота. Полученные образцы представляют собой разупорядоченную структуру типа  $\alpha$ -C (1). Введение ионного ассистирования в процесс напыления позволяет увеличить проводимость на 5 порядков, при этом зависимость удельного сопротивления от энергии стимулирующих ионов имеет минимум при энергии 400 эВ.

Результаты проведенных исследований методами просвечивающей электронной микроскопии, спектроскопии характеристических потерь энергии электронов и электронной дифракции позволяют сделать вывод, что при ионном облучении формируются нанокристаллические графитовые включения. При этом наблюдается зависимость электросопротивления от особенностей морфологии образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Andrea Carlo Ferrari and John Robertson. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 2004 362, 2477-2512

## ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ $O_2^+$ НА СОСТАВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОИСТЫХ СТРУКТУР Si-Cu

З.А. Исаханов, Б.Е. Умирзаков, Р. Джаббарганов,  
М.К. Рузибаева, Ш.И. Хамракулов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз  
им. У.А. Арифова, Ташкент, Узбекистан

В настоящее время широко исследуется кремний с нанопленкой и нанокристаллами силицидов металлов, а также многослойные системы Si-Me-Si-Me, на основе которых разрабатываются современные приборы микро- и нанoeлектроники и т.д. Что касается влияния имплантации ионов кислорода на свойства свободных пленок Si/Cu, практически не исследовано.

В данной работе приведены результаты по изучению состава, кристаллической структуры и профилей распределения атомов по глубине свободной пленочной системы Si/Cu имплантированного ионами кислорода с  $E_0=1$  кэВ с разными дозами при вакууме не хуже  $10^{-5}$  Па. Перед ионной имплантацией пленка кремния обезгаживалась при  $T=750$ К. На поверхности пленки кремния содержится ряд примесных атомов, основными из которых являются кислород и углерод.

Исследование проводилось с использованием методов ОЭС и УФЭС. При больших дозах облучения ионами ( $D_{нас} \approx 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ), поверхность Si/Cu разупорядочивается и однородно легируется ионами кислорода. При этом поверхностная концентрация кислорода  $\sim 40-45$  ат.% и она практически не меняется до глубины 20-25 Å. В этих слоях образовались соединения типа  $Si_2O$ , SiO,  $SiO_2$ , а также соединялись несвязанные атомы Si и O. После прогрева при  $T=750-800$ К в основном образовались соединения типа  $SiO_2$  и SiO. Ширина запрещенной зоны этой пленки  $\sim 3-3,5$  эВ. В работе оценена степени ионности связи, ширина запрещенной зоны  $E_g$  и величины переносимого заряда  $\Delta q$  в кремний для SiO и  $SiO_2$ .

Соединение	$E_g$ , эВ	$\alpha$ , %	$\Delta q$
SiO	2,3	56	1,3
SiO <sub>2</sub>	3,6	56	1,6

## ФОРМИРОВАНИЕ ОКСИДНЫХ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕДНЫХ СПЛАВОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ МОЩНЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ

Т.В. Панова, В.С. Ковивчак, А.А. Шмидт  
Омский государственный университет  
им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

Одним из важных поверхностных свойств металлических сплавов является сопротивление окислению, значительное влияние на которое может оказать облучение мощным ионным пучком (МИП) наносекундной длительности. Формирование оксидных соединений на поверхности сплавов меди достаточно хорошо изучено. Воздействие МИП на сплавы меди приводит к изменению в поверхностном слое содержания легирующих элементов, имеющих различную летучесть и склонность к окислению. Окисление таких облученных медных сплавов в настоящее время не изучено.

В работе исследовано влияние модификации мощным ионным пучком (30%  $H^+$  +70%  $C^+$ ,  $E \approx 200$  кэВ,  $j \leq 150$  А/см<sup>2</sup>,  $\tau=60$  нсек) на окисление меди и латуни ЛС-59-1. Облученные и исходные образцы подвергались циклическому отжигу на воздухе с длительностью одной операции отжига 3–7 часов.

Методами рентгеноструктурного анализа, оптической и электронной микроскопии была изучена морфология поверхности и микроструктура окисных слоев до и после облучения, а также проанализированы процессы, протекающие при окислении после облучения МИП. Обнаружено, что облучение МИП приводит к образованию оксидов нестехиометрического состава. Сложный характер процесса окисления приводит к образованию многослойной окисной пленки на поверхности исследуемых материалов, связанной с образованием фаз с сильно различающимися свойствами. Обсуждается возможность формирования пленки оксида цинка на поверхности облученной латуни и ее влияние на процессы образования оксидов при циклическом отжиге на воздухе.

СОСТАВ И МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ  $\text{CaF}_2$  С  
НАНОРАЗМЕРНЫМИ ФАЗАМИ SiБ.Е. Умирзаков, Р.Х. Ашуров, Г.Х. Аллаёрова,  
Д.А. ТашмухамедоваТашкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан

Известно, что создавая определенные условия можно получить регулярно расположенные одинаковые по размерам и составу наноструктуры с высокой устойчивостью. В качестве упорядоченных зародышей могут использоваться специально созданные дефекты. Такие дефекты можно создавать методом низкоэнергетической ионной бомбардировки в сочетании с отжигом. Бомбардировка в основном производилась ионами  $\text{Ag}^+$  с  $E_0 = 1$  кэВ с вариацией дозы облучения в пределах от  $10^{12}$   $\text{см}^{-2}$  до  $10^{14}$   $\text{см}^{-2}$ .

Наиболее регулярные с одинаковыми размерами нанокластеры формировались при адсорбции атомов Si на  $\text{CaF}_2$ , облученного с  $D = 5 \cdot 10^{13}$   $\text{см}^{-2}$ . При этой дозе поверхность  $\text{CaF}_2$  пока еще не теряет свою кристалличность, но происходит образование дефектных центров обогащенных атомами Ca с поверхностными размерами  $d = 1,5 - 2$  нм. Напыление атомов Si с толщиной  $\theta$  примерно одного монослоя и последующий прогрев при  $T \approx 800$  К приводит к формированию на поверхности  $\text{CaF}_2$  монокристаллических фаз Si с диаметром 10 – 15 нм. Расстояние между центрами этих островков составляло 50 – 60 нм.

Увеличение толщины слоев атомов Si до 3 монослоев приводило к монотонному росту размеров (основания и высоты) островков: диаметр островков составлял  $d = 20 - 30$  нм, а их высота – 10 - 15 Å. При этом степень покрытия поверхности  $\text{CaF}_2$  атомами Si лежит в пределах 35 – 40 %, что хорошо согласуется с данными полученными методом РЭМ.

При  $\theta_{\text{Si}} = 8$  монослоев средний диаметр островков составляет 40 – 50 нм, а их высота 15 – 20 Å. При этом границы островков начинают перекрываться друг с другом.

COMPOSITION OF CATALYTIC LAYERS PREPARED BY ION BEAM ASSISTED DEPOSITION OF PLATINUM AND GADOLINIUM ON CARBON SUBSTRATES

V.V. Poplavsky, A.V. Dorozhko  
Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

Surface layers were prepared by ion beam assisted deposition of catalytic metal – platinum and gadolinium as activating additive on the glassy carbon (GC), and carbon based Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T (TorayCFP) and AVCarb<sup>®</sup> Carbon Fiber Paper P50 (AVCarbCFP) catalysts carriers. The deposition of metal and mixing of the deposited layer with the substrate surface by accelerated ( $U = 5$  kV) ions of the same metal have been carried, respectively, from neutral fraction of metal vapor and ionized plasma of vacuum pulsed electric arc. According to EDX, XRF and RBS (Fig. 1) results of investigations atoms of deposited metals, carbon substrates, and oxygen as impurity enter into the composition of layers.

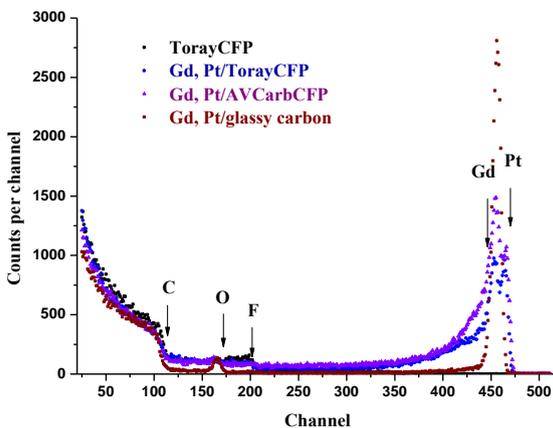


Fig. 1. Rutherford backscattering spectra of  $^4\text{He}$  ions from surfaces of investigated samples.  $E_0 = 1,5$  MэВ

The thickness of the prepared layers is  $\sim 30$  nm; content of each of deposited metal atoms in the layers –  $\sim 2 \times 10^{16}$  cm $^{-2}$ . In the process of ion-assisted deposition of metals in the proposed mode, ionic mixing of all components of the layer being formed takes place.

СВОЙСТВА ГЕКСАГОНАЛЬНОГО КРЕМНИЯ,  
СИНТЕЗИРУЕМОГО С ПОМОЩЬЮ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

А.А. Никольская, Д.С. Королев, А.Н. Михайлов, А.И. Белов,  
А.А. Сушков, Д.А. Павлов, Д.И. Тетельбаум  
Университет Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Поиск светоизлучающих материалов, совместимых с кремниевой технологией, является ключевой задачей развития современной оптоэлектроники и интегральной оптики. Перспективным материалом в этом случае считается гексагональный кремний, который в отличие от обычного (кубического) кремния обладает лучшими люминесцентными свойствами за счет модификации его зонной структуры. При этом технологии создания таких материалов должны быть максимально совместимы с традиционной микроэлектронной технологией. В работе исследуются структурные, морфологические и люминесцентные свойства гексагонального кремния, полученного с помощью двойной имплантации ионов  $Ga^+$  и  $N_2^+$ , а так же ионов  $Kr^+$  в пленки диоксида кремния на кремнии с последующим отжигом. Методом просвечивающей электронной микроскопии показано, что в подложке кремния на границе с диоксидом образуются включения гексагональной фазы 9R-Si. Исследование фотолюминесценции для образцов, облученных  $Kr^+$ , показало наличие полосы на длине волны 1240 нм, которая предположительно относится к излучению фазы 9R-Si. Предполагается, что за синтез данной фазы ответственны механические напряжения, возникшие при имплантации и отжиге, релаксация которых при температурах, близких к пороговой для пластической деформации кремния, реализуется в форме фазового перехода приповерхностного слоя Si.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (№ 16.2737.2017/4.6).

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОГРЕВА НА  
СОСТАВ И ЭЛЕКТРОННОГО СТРУКТУРУ ТОНКИХ ПЛЕНОК  
 $Cd_{0,5}Ba_{0,5}/CdTe$

Ё.С. Эргашов, Г.Х. Аллярова, Б.Е. Умирзаков  
Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан

Известно[1], что низкоэнергетическая имплантация ионов  $Va^{+}$  в  $CdTe(111)$  в сочетании с прогревом позволяет получить нанопленок  $CdVaTe$  с толщиной  $d=20-50 \text{ \AA}$ .

В данной работе изучены влияние высокотемпературного отжига состав, структуру, электронные свойства пленки  $Cd_{0,5}Ba_{0,5}Te$  с толщиной  $\sim 50 \text{ \AA}$ , полученной на поверхности монокристаллическим  $CdTe$  имплантацией ионов  $Va^{+}$  с последующим прогревом при  $T=1000 \text{ K}$ .

В таблице приведены состав, толщина и значение  $E_g$  пленки  $Cd_{0,5}Ba_{0,5}Te/CdTe(111)$ , измеренных после прогрева при различных температурах. Время прогрева при каждой  $T$  составляет  $\sim 30 \text{ мин}$ .

T, K	Пленка	Вид	d, \AA	$E_g$ , эВ
1000	$Cd_{0,5}Ba_{0,5}Te$	Сплошная	50	1,7
1100	$Cd_{0,6}Ba_{0,4}Te$	Сплошная	50	1,55-1,6
1200	$Cd_{0,7}Ba_{0,3}Te$	Остров- ковая	-	1,5*
1300	$CdTe$	Моно- кристалл	Моно- кристалл	1,45

\* - усредненное значение

Видно, что после прогрева при  $T=1000 \text{ K}$  концентрация  $Va$  уменьшается до 15-20 ат.% и образуется сплошные пленки  $Cd_{0,6}Ba_{0,4}Te$  с  $E_g=1,55-1,6 \text{ эВ}$ . Увеличение  $T$  до 1200 K приволил к формированию островковой пленки примерным составом  $Cd_{0,7}Ba_{0,3}Te$ . При  $T=1300 \text{ K}$  трехкомпонентная пленка полностью испаряется.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. З.Э. Мухтаров, З.А. Исаханов, Б.Е. Умирзаков, Т. Кодиров, Е.С.Эргашев // Журнал технической физики, 2015, том 85, вып. 12, стр.146-149.

## ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ ПЛАЗМОЙ РАЗРЯДА

А.И. Кудюкин, М.Н. Махмудов, К.Е. Серёгин, В.А. Степанов,  
Е.Н. Моос, Е.Я. Черняк  
Рязанский государственный университет  
имени С.А. Есенина

Элементный анализ двухкомпонентного сплава электродов камер (Cu-Cr) вдоль линий растекания (продольной и поперечной) показал, что концентрация меди уменьшается при движении из центра к краю оплавления от 72 % до 53,4 % (поперечное сканирование) и от 71,7 % до 61,4 % (продольное сканирование), что свидетельствует о скоплении атомов хрома по краям зоны расплава. Кристаллизация электродов происходит в неравновесных условиях, а сравнение с диаграммой состояния Cu-Cr показывает, что объемная концентрация Cu - 60%, а поверхностная - 72%, т.е. атомы Cu сегрегируют к поверхности ( $\Delta n = 10 - 12\%$ ).

Вакуумные камеры откачивались вакуумных водородных печей серии "Кристалл" до давления  $\sim 10^{-4}$  Па, а затем в пространстве под колпаком, где устанавливалось несколько изделий, напускался водород до  $10^{-2} - 10^{-3}$  Па. Квадрупольный масс-спектрометр КМС-250 (разработка рязанско-го предприятия «Шибболет») регистрировал состав остаточных и рабочих газов на протяжении всего времени работы. В спектрах выделялись линии рабочих газов (водород и гелий), линии, соответствующие диффузионным маслам типа  $C_xH_n$  и адсорбированных слоев молекул  $CO_2$ , воды, азота и их полиатомных образований.

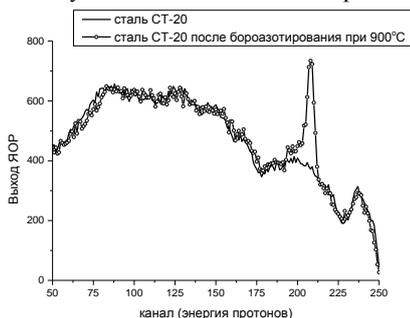
Зафиксировано изменение состава указанных компонент при прогрев до температуры  $800^{\circ}C$ . При повышении температуры до  $815^{\circ}C$  амплитуды линий водорода и воды уменьшались, а окиси углерода и азота увеличивались.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФУЗИИ АЗОТА И БОРА В СТАЛЯХ  
МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ  
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФУЗИИ АЗОТА И БОРА В СТАЛЯХ  
МЕТОДОМ ЯОР

В.С. Белкин<sup>1)</sup>, В.Г. Востриков<sup>2)</sup>, А. И. Каменских<sup>2)</sup>, Н.В. Ткаченко<sup>2)</sup>,  
<sup>1)Московский авиационный институт (НИУ), Москва, Россия</sup>  
<sup>2)НИИЯФ МГУ, Москва, Россия</sup>

Диффузионное насыщение азотом или бором сталей методами электролитно–плазменной обработки существенно улучшает их трибологические характеристики. Модифицированный слой, состоящий из оксидного слоя и твердого раствора диффундирующего элемента в стали, улучшает прирабатываемость и позволяет снизить массовый износ.

В настоящей работе проведены исследования по повышению эксплуатационных свойств стали путём электролитно-плазменного бoroазотирования в водном электролите при температурах обработки от 600-1000°С. Показано, что при повышении температуры обработки растут эксплуатационные свойства материала.



Сравнение спектров ЯОР до и после бoroазотирования

Для определения элементного состава образцов использовался метод ядерного обратного рассеяния протонов (ЯОР). Измерения показали, что при увеличении температуры обработки происходит диффузия бора на большую глубину (6,5 мкм для 750°С и 10 мкм для 900°С), благодаря чему повышаются прочностные характеристики изделия.

ЭЛЕКТРОННО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ЗАРЯДКА  
 МОНОКРИСТАЛЛОВ САПФИРА И КВАРЦА ПОСЛЕ ИХ  
 ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ И ПРОТОНАМИ

Е.Ю. Зыкова, И.П. Иваненко, К.Ф. Миннебаев, К.Е. Марковец,

Э.И. Рау, А.А. Татаринцев

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
 Москва, Россия

В работе изучалась кинетика зарядки монокристаллов сапфира ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и кварца ( $\text{SiO}_2$ ), предварительно облученных ионами  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Ga}^+$ ,  $\text{Zn}^+$  и протонами в широком интервале энергий (10 – 150 кэВ). Измерения коэффициента вторичной электронной эмиссии и поверхностного потенциала проводились в сканирующем электронном микроскопе для двух энергий (5 и 15 кэВ) и двух плотностей тока ( $10^{-7}$  и  $10^{-5}$  А/см<sup>2</sup>) электронов. На рис.1 представлено изменение поверхностного потенциала  $V_s$  сапфира и кварца в зависимости от времени электронного облучения. Видно, что ионное облучение существенно изменяет зарядовые характеристики образцов.

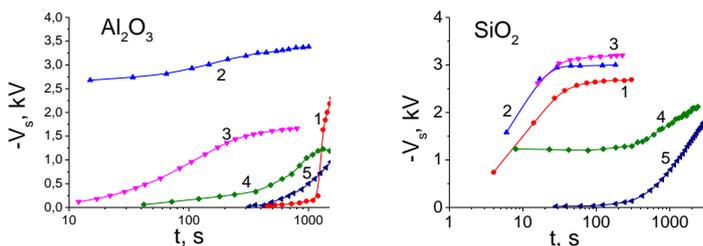


Рис.1 Зависимость поверхностного потенциала  $V_s$  сапфира и кварца от времени облучения электронами с энергией  $E_0 = 5$  кэВ и плотностью тока  $j_0 = 10^{-7}$  А/см<sup>2</sup>. График (1) – исходная поверхность; (2) – после облучения ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией 10 кэВ; (3) – после облучения ионами  $\text{Ga}^+$  с энергией 15 кэВ, (4) – после облучения протонами с энергией 50 кэВ, (5) – после облучения протонами с энергией 150 кэВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-02-00813а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Э.И. Рау, А.А. Татаринцев, Е.Ю. Зыкова и др. // Физика твердого тела, 2017, т.59, № 8, с.1504.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ  
ДЕФЕКТОВ ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ КРЕМНИЯ С  
УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ  
СТОХАСТИЧНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ И ЭВОЛЮЦИИ ДЕФЕКТОВ

Е.В. Окулич<sup>1)</sup>, В.И. Окулич<sup>1)</sup>, Д.И. Тетельбаум<sup>1)</sup>, А.А. Шемухин<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Университет Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

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

Модели накопления дефектов при ионном облучении, основанные на решении одномерных кинетических уравнений, предполагают однородное распределение компонентов пар Френкеля (КПФ) в плоскостях, параллельных поверхности, что не выполняется при малых дозах ( $\Phi$ ) и плотностях ионного тока ( $j$ ), а также для ионов с большими массами. В настоящей работе методами Монте-Карло и молекулярной динамики рассмотрен более общий случай, когда КПФ генерируются в каскадах, стохастически распределенных во времени и пространстве, а эволюция каскадов рассматривается на основе диффузионно-коагуляционной модели. Молекулярная динамика используется для определения или уточнения используемых при расчете параметров. Для ионного облучения ( $\text{Ne}^+$ ,  $\text{Si}^+$ ,  $\text{Kr}^+$ ) рассчитаны нижние границы  $\Phi$  и  $j$  применимости одномерного приближения, а также кинетика усредненной по латеральным координатам степени дефектности (в частности, средней концентрации дивакансий на определенной глубине как функции дозы и плотности ионного тока) в широком диапазоне параметров  $\Phi$  и  $j$ .

Методом RBS-C исследована зависимость степени радиационного повреждения от  $\Phi$  и  $j$  при облучении Si ионами с разными массами при энергии 100 кэВ. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (№ 16.2737.2017/ПЧ).

ДЕЛОКАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭРОЗИИ  
ПОВЕРХНОСТНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИИ.А. Зельцер<sup>1,2)</sup>, Е.Н. Моос<sup>2,3)</sup><sup>1)</sup> АО «РЗМКП», Рязань, Россия<sup>2)</sup> ООО «Эктон», Москва, Россия<sup>3)</sup> РГУ им. С. Есенина, Рязань, Россия

Известна проблема, связанная с модифицированием поверхности при ионном воздействии. В работе анализируется возможность формирования эрозионно-стойких наноструктур нитридов железа и никеля в поверхностной области контактных поверхностей геркона. Указанные структуры не только ограничивают процесс массопереноса при прохождении тока, но и определяют условия, препятствующие локализации эрозии, что стимулирует ее переход к планарному типу, повышает эрозионную стойкость контактных поверхностей.

Основой для моделирования и исследования указанных процессов служили железоникелевые контакты геркона (серии МКА-14103), находящиеся в стеклянном баллоне с атмосферой азота. При электрических испытаниях составлялась цепочка из 11 последовательно включенных такого рода приборов. Концы этой цепи подключались к генератору, формирующему разнополярные высоковольтные ВЧ импульсы с периодом следования 1 мс и со сменой полярности через каждые 10 мс. Всего за каждый полупериод смены полярности генерировались 5 импульсов. Изменение со временем величины каждого импульса напряжения на разомкнутых контактах геркона происходило по периодическому затухающему закону  $U = U_0 e^{-\beta t} \cos(2\pi \vartheta t)$  с амплитудой  $U_0 = 1700$  В, коэффициентом затухания  $\beta = 0,26 \text{ мкс}^{-1}$  и частотой  $\vartheta = 463,0$  кГц.

Результатом такой обработки в течение 13 минут явилось образование поверхностных квазипериодических структур азотированных конусообразных новыступов высотой около 100 нм и диаметром основания около 1 мкм (квазипериод расположения составил 1-2 мкм).

РАСПЫЛЕНИЕ МИШЕНИ И ОБРАЗОВАНИЕ ПЛЕНОК ПРИ  
ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ  $C_{60}$ 

К.В. Крайнов<sup>1)</sup>, М.В. Малеев<sup>2)</sup>, В.Е. Пуха<sup>3)</sup>, Н.Н. Дремова<sup>3)</sup>,  
А.Л. Шахмин<sup>1)</sup>, А.В. Архипов<sup>1)</sup>, П.А. Карасёв<sup>1)</sup>, А.И. Титов<sup>1)</sup>,  
Ю.С. Попова<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Санкт-Петербургский Политехнический университет  
Петра Великого, С.-Петербург, Россия

<sup>2)</sup>Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

<sup>3)</sup>Институт ПХФ РАН, Черногловка, Россия

<sup>4)</sup>МГУ, Москва, Россия

Ранее была показана возможность осаждения нанокompозитных углеродных покрытий облучением подложки пучками ионизированных молекул фуллерена  $C_{60}$ . Такие покрытия потенциально имеют множество практических областей использования. Однако, зависимость свойств получаемых пленок от параметров процесса требуют дальнейших исследований.

В данной работе Ti и Si подложки облучались ионами  $C_{60}$  с энергией 5 и 8 кэВ и дозой  $3.8 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Температура подложек ( $T_s$ ) при нанесении поддерживалась равной 100, 200, 300 и 400°C. Полученные покрытия исследовались такими методами как RBS, XPS, SEM, AFM.

Анализ кинетики роста углеродных пленок из ускоренных ионов  $C_{60}$  на поверхности Ti и Si показал, что при энергии ионов 5 кэВ во всем температурном интервале молекулы фуллеренов разрушаются при попадании на поверхность мишени и формируют плёнки тетраэдрического углерода с довольно высоким содержанием алмазной фазы.

При энергии ионов 8 кэВ и  $T_s$  равной 100 и 200°C происходит распыление мишеней. Увеличение температуры подложки до 300°C приводит к росту углеродной пленки на её поверхности. Таким образом, обнаружен новый эффект – резкое изменение коэффициента распыления в интервале 200-300°C.

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА НА КРЕМНИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ

М.С. Тужилкин, П.А. Карасев, К.В. Карабешкин,  
А.И. Титов, М.В. Мишин, И.К. Боричева  
СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Наночастицы (НЧ) благородных металлов находят всё более широкое применение как катализаторы, сенсоры и т.д. /1/. Облучение тонких металлических плёнок на поверхности различных подложек быстрыми ионами является одним из безводных методов синтеза НЧ /2/. Локальное повышение плотности выделения энергии у поверхности мишени при бомбардировке молекулярными ионами может позволить существенно снизить дозы, требуемые для формирования заданных морфологии плёнки и распределения НЧ на поверхности, оказывая в то же время меньшее радиационное воздействие на подложку /3/.

Золотые плёнки толщиной  $\sim 1.5$  нм облучались ионами Ta,  $\text{BF}_2$  и  $\text{PF}_4$  с энергией 0.65 кэВ/аеи, причём образцы, облучённые разными видами ионов, сравнивались между собой при одинаковом количестве смещений атомов золота, произведенных ионами в плёнке (displacement per atom - DPA). Облучение тяжёлыми атомарными ионами разбивает плёнку на фрагменты во всём диапазоне исследуемых флюенсов. Облучение молекулярными ионами при низком флюенсе  $\sim 10^{-5}$  DPA ( $\sim 10^{11}$  см<sup>-2</sup>) приводит к уменьшению шероховатости исходной плёнки. Такой тип воздействия продолжается в широком диапазоне доз. При высоком флюенсе  $\sim 10^{-2}$  DPA происходит резкий переход от уменьшения шероховатости к разбиванию плёнки и образованию Au НЧ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Z. Huang, N. Geyer, P. Werner, J. de Boor, U. Gösele // *Advanced Materials*, 2011, 285-308.
2. R. LoSavio, L. Repetto, P. Guida, et. al. // *Solid State Comm.*, 2016, 240, 41-45.
3. К.В. Карабешкин, П.А. Карасёв, А.И. Титов // *ФТП*, 2016, 50, 1009.

МОДИФИКАЦИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ  
СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИХ ФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ  
ЭЛЕКТРОННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ

О.А. Подсвиров<sup>1)</sup>, У.В. Юрина<sup>1)</sup>, Г.Р. Рахманова<sup>1)</sup>, А.И. Сидоров<sup>2)</sup>,  
М.Н. Шинкаренко<sup>2)</sup>, Ю.К. Федоров<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Политехнический Университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия,

<sup>2)</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе исследовались фосфатные стекла с высоким содержанием серебра (17 и 30 мол.%  $\text{Ag}_2\text{O}$ ). Локальное облучение электронами проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа с энергиями электронов 5 и 50 кэВ и дозой 50 мКл/см<sup>2</sup>. Эксперименты показали, что электронное облучение приводит к формированию в облученной зоне стекла нейтральных молекулярных кластеров серебра с высокой концентрацией. По периметру облученной зоны наблюдается люминесценция молекулярных кластеров, в центральной части происходит концентрационное тушение люминесценции. При энергии электронов 5 кэВ на поверхности стекла формируется тонкая пленка серебра. Основным механизмом наблюдаемых эффектов является полевая миграция ионов серебра из объема стекла в зону облучения, их восстановление термализованными электронами и образование молекулярных кластеров. Последующая термообработка приводит к формированию в стекле наночастиц серебра, обладающих плазмонным резонансом. Полученные результаты могут быть использованы для создания новых оптических материалов для фотоники и наноплазмоники.

ОБРАЗОВАНИЕ ВАКАНСИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ  
КРИСТАЛЛОВ ОКСИДА ЦИНКАБ.Г. Атабаев<sup>2)</sup>, У.Б. Шаропов<sup>1)</sup>, Р. Джаббарганов<sup>2)</sup><sup>1)</sup> Ташкентский государственный технический университет  
им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан<sup>2)</sup> Институт ионно-плазменных и лазерных технологий  
им. У.А. Арифова, Ташкент, Узбекистан

Вторично-электронная эмиссия и эффект зарядки под воздействием электронного облучения изучается в течение многих лет, однако ряд аспектов этого многогранного явления все еще не до конца понятен и требует дальнейшего исследования. Последнее обстоятельство диктуется тем, что изучение проблем зарядки диэлектриков имеет не только научное, но и большое практическое значение, например, для аналитических электронно-зондовых методов исследований, электронной литографии, и космической техники, во многих современных технологиях.

Проведенные сравнительные исследования на спектрометре полного тока поли и монокристаллов ZnO показывает, что облучение электронами на поверхности образуются экситоны, распад которых приводит к образованию свободного электрона и нейтрального кислорода, который десорбируется с поверхности, оставляя на поверхности вакансию кислорода. Энергетически выгодные места (на вакансию кислорода) захватываются электронами, которые создают на поверхности отрицательную зарядку. Увеличение энергии бомбардирующих электронов приводит к образованию ещё больше кислородных вакансий за счет электронно-стимулированной десорбции.

Анализ спектров ПТ показывает, что облучение кристаллов оксида цинка электронами с энергией  $E > 4\text{эВ}$  приводит к накоплению отрицательного заряда на поверхности. Зарядка на поверхности образуется за счет захвата электронов на вакансиях кислорода.

Определено энергетический порог образования вакансии кислорода на поверхности кристаллов ZnO.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ  
ВОЛЬФРАМА, ИНДУЦИРОВАННОЙ ПОД  
ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ,  
КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ  
МЕТОДАМИ

А.В. Дубинко<sup>1)</sup>, Д.А. Терентьев<sup>1)</sup>, А.В. Бакаев<sup>1)</sup>,  
Чао Инь<sup>1,2)</sup>, Е.Е. Журкин<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Бельгийский центр ядерных исследований, Мол, Бельгия

<sup>2)</sup> Университет Левена, Левен, Бельгия

<sup>3)</sup> Санкт-Петербургский Политехнический университет  
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Сплавы вольфрама рассматриваются в качестве перспективных материалов для компонентов токамака, непосредственно контактирующих с высокотемпературной плазмой. В работе проведено изучение образцов W после применения глубокой пластической деформации с помощью просвечивающей электронной микроскопии, измерений микротвердости, а также с помощью дифракционного анализа отражённых электронов. Исследование показало, что существует корреляция между значением микротвердости и эволюцией микроструктуры, индуцированной пластической деформацией. В зависимости от начальной микроструктуры материала (размер зерна и плотность/размер упрочняющих частиц) наблюдалось измельчение зерен и образование плотной дислокационной сетки. Для исследованных образцов, была определена эмпирическая зависимость микротвердости от плотности дислокаций.

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА ПЛЕНОК НИТРИДОВ АЛЮМИНИЯ И КРЕМНИЯА.В. Кабышев, Ф.В. Конусов, С.К. Павлов  
НИТПУ, Томск, Россия

Повышение радиационной стойкости (РС) электронных приборов стимулирует изучение электронных свойств и радиационных дефектов (РД) в составляющих их материалах при радиационно-термическом воздействии. Высокой РС обладают такие широкозонные материалы, как нитриды алюминия  $\text{AlN}$  и кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Целью работы является исследование РС тонких пленок  $\text{AlN}$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , осажденных методом реактивного магнетронного распыления на подложки из стали, кремния и стекла при облучения их мощным импульсным ионным пучком (энергия  $\sim 250$  кэВ, плотность энергии  $\sim 0.2$  Дж/см<sup>2</sup>, флюенс  $10^{12}$ – $10^{15}$  см<sup>-2</sup>) и определение влияния РД различной природы на оптические свойства пленок /1/. Оптические свойства необлученных пленок обусловлены локализованными состояниями (ЛС) ростовых дефектов, непрерывно распределенными в запрещенной зоне (ЗЗ). Уровень Ферми в пленках закреплен вблизи середины их ЗЗ. В  $\text{AlN}$  преобладающее влияние на свойства оказывают ростовые и РД типа междоузельных ионов  $\text{Al}_i$  и междоузельно-вакансионных пар  $\text{Al}_i\text{-V}_N$ ,  $\text{Al}_i\text{-O}_N$  с локальными уровнями в ЗЗ. В  $\text{Si}_3\text{N}_4$  идентифицированы локальные полосы поглощения, обусловленные ростовыми и РД типа оборванных связей  $\text{Si}_i$ , междоузлий  $\text{Si}_i$  и анионных вакансий  $\text{V}_N$ . РС пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  значительно выше, чем у  $\text{AlN}$ . Пленки  $\text{AlN}$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  несущественно уступают по РС таким радиационно-стойким материалам, как  $\text{h-BN}$  и  $\text{SiC}$ , а их РС выше, чем у пленок  $\text{B}_4\text{C}$  и стекла. РС пленок обусловлена высокой концентрацией ростовых дефектов  $(1\text{--}15)\cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> и широким краем поглощения, сформированным на ЛС дефектов 1.5–3.4 эВ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ремнев Г.Е., Иванов Ю.Ф., и др. // ЖТФ, 2009, Т.79, в.4, С. 156.

ИОННО-ИМПЛАНТАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ДЫРОК В СЛОЯХ GaSb

В.К. Васильев, Ю.А. Данилов, В.П. Лесников, Е.А. Питиримова

Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Ионная имплантация позволяет контролируемо вводить радиационные дефекты (РД) в полупроводники. Точечные РД, которые образуются при облучении легкими ионами средних энергий в узкозонных полупроводниках, являются преимущественно донорами (InAs) или акцепторами (GaSb). В настоящей работе исследованы электрические свойства слоев GaSb при облучении ионами He<sup>+</sup> с энергией 40 кэВ. Слои GaSb толщиной 50 нм были получены на подложках i-GaAs(100) методом импульсного лазерного нанесения при температурах 200 – 400°С. Исследование структуры методом электронографии на отражение показало, что слои GaSb, выращенные при температуре 300 – 400°С, являются монокристаллическими. Облучения выполнены при комнатной температуре мишени с дозами в диапазоне от 10<sup>12</sup> до 1.5·10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>. Проведены измерения эффекта Холла по методике Ван-дер-Пау. Поверхностное сопротивление ( $R_s$ ) слоев сначала увеличивается вплоть до дозы 10<sup>13</sup> см<sup>-2</sup>, а затем монотонно уменьшается, достигая значений 370 Ом/кв. при максимальной дозе имплантации. Начальное повышение значений  $R_s$  обусловлено резким падением подвижности дырок от 40 до 20 см<sup>2</sup>/В·с. С дальнейшим увеличением дозы подвижность уменьшается до 3 – 5 см<sup>2</sup>/В·с. Концентрация носителей монотонно увеличивается во всем диапазоне доз, достигая при максимальной дозе имплантации значений порядка 10<sup>21</sup> см<sup>-3</sup>. Такая методика увеличения концентрации может быть использована для модифицирования ферромагнитных полупроводников типа GaAs:Mn или GaSb:Fe.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки России (№8.1751.2017/ПЧ).

## МАТРИЦЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

А. А. Шемухин<sup>1)</sup>, Б. Мерзук<sup>1)</sup>, Е. Н. Муратова<sup>2)</sup><sup>1)</sup> МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия<sup>2)</sup> СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

Работа посвящена исследованию влияния ионизирующего излучения на живые системы с помощью локализованного воздействия высокоэнергетических зараженных пучков на биологические объекты. В качестве диэлектрической фокусирующей матрицы были выбраны мембраны  $\text{por-Al}_2\text{O}_3$  с высоким аспектным отношением (до 500) и заданным диаметром (20–200 нм) упорядоченной пористой структуры.

В рамках работы были проведены исследования по росту колоний различных бактерий на ростовых модулях  $\text{por-Al}_2\text{O}_3$ . Медико-биологические исследования подтвердили эффективность использования таких модулей для осуществления подачи питательной среды, что резко сокращает временной интервал для роста колоний бактерий.

Важной задачей при использовании пучков частиц является транспортировка их к объекту исследования. Результаты исследований показали возможность реализовать пространственную локализацию ионного воздействия на подложку с наноразмерным разрешением.

Предлагаемая методика по использованию сфокусированных ионных пучков высоких энергий позволит локально воздействовать на исследуемые биологические микрообъекты. Возможность выбора типа ионов, а, следовательно, и типа излучения, с контролируруемыми величинами и мощностями дозы излучения будет способствовать эффективному проведению исследования в режиме *in-vitro* и получению достоверного результата.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60110 мол\_а\_дк

ФОРМИРОВАНИЕ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ НА  
ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ  
ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

З.М. Хамдохов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Институт информатики и проблем регионального управления  
КБНЦ РАН, Нальчик, Россия

В работе предложены два способа получения массива автоэмиссионных эмиттеров, в которых усиление тока основано на факторе топографического усиления поля на микроостриях и на усилении электронного потока в каналах микроканальных пластин (МКП).

Нами была исследована эмиссия матричного автоэмиссионного катода с количеством кремниевых микроострий до 6000 и плотностью упаковки  $\sim 1 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ . На микроострия ионно-плазменным методом осаждалась эмитирующая пленка из углерода. Показано, что многоострийные катоды имеют невысокую однородность электронной эмиссии из-за проблемы воспроизведения микроострий только одинаковой формы и размеров.

В данной работе изготовлен катод с опорной структурой из МКП диаметром 24.8 мм и с каналами диаметром 6 мкм, внутри которых ионно-плазменным методом сформированы регулярно расположенные эмиттеры на основе графитоподобных наноструктур. Показано, что катоды на основе МКП имеют однородную эмиссию при низком рабочем напряжении. Предельный выходной ток около  $1 \text{ mA/cm}^2$  достигается при  $U_{\text{раб}} \sim 400 \text{ В}$ .

## АНАЛИЗ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗОВ МЕТОДОМ РЕЗЕРФОРДОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

С.И. Кузнецов, В.В. Сохорева, В.М. Малютин  
Томский политехнический университет, Томск, Россия

Благодаря исключительной химической устойчивости и инертности к агрессивным средам, а также ряду других уникальных свойств, кристаллы алмаза всё шире применяются в различных отраслях промышленности и современной техники как инструментальный и конструкционный материал.

С помощью высокочувствительных аналитических методов выяснено, что природные алмазы содержат широкий набор различных примесей [1]. В кристаллах с оболочкой в поверхностном слое в больших количествах могут присутствовать следующие примеси: N, O, Mg, Si, Ca, Ti, Fe и другие элементы. Наличие и содержание определенных примесей, особенно на поверхности природного алмаза, могут повлиять на выбор способа полного извлечения кристаллов из руды и отделения алмазов от пустой породы.

В настоящей работе исследована возможность использования метода резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов He-4 для количественного определения содержания примесей в приповерхностной области природных алмазных кристаллов. Экспериментальная часть работы выполнена на электростатическом ускорителе ЭСГ-2,5 МэВ с энергией ускоренных ионов гелия 1860 кэВ. В качестве регистрирующего устройства рассеянных ионов использовался кольцевой кремниевый детектор, что позволило значительно уменьшить ток пучка ионов и исключить искажение энергетического спектра за счет люминесценции и накопленного поверхностного заряда. Были определены примеси, влияющие на смачиваемость природных алмазов для разных месторождений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. Изд. 2-е. М.: Наука, 1984. 170 с.

ДЕГРАДАЦИЯ ПЕРОВСКИТНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЯЧЕЕК ПОД  
ДЕЙСТВИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Б.Л. Оксенгендлер, С.Е. Максимов, Ж.Т. Азимов, М.И. Ахмедов,  
В.Ю. Соколов

Институт химии и физики полимеров Академии Наук  
Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

Среди проблем создания солнечных ячеек на основе перовскитов /1/ особое место занимают вопросы их стабильности. Механизмы радиационной деградации перовскитов были рассмотрены в /2/. Показано /2/, что вследствие процессов двухступенчатого дефектообразования наличие лёгких атомов водорода в органической части значительно снижает порог образования дефектов  $E_d$  при облучении лёгкими заряженными частицами, включая электроны:  $e \rightarrow H$ ;  $H \rightarrow I_S \rightarrow I_I$ , где  $I_S$  и  $I_I$  – узловый и междоузельный атом йода, причём последний является киллер-центром для электронов и дырок. В настоящей работе нами исследовано влияние пространственного разделения между первично выбитым протоном и выбиваемым атомом  $I$  на эффективную величину энергии  $E_d'(L)$ . Показано, что при смещении близкого атома йода  $I$  зона неустойчивости обусловлена силами упругости, тогда как при выбивании дальнего  $I$  зона неустойчивости – кулоновского происхождения, и она больше, чем в первом случае. В результате величина параметра радиационной стойкости (ПРС)  $C = W(L) \cdot E_d'(L)$ , где  $W(L)$  – вероятность добегающего протона до выбиваемого атома  $I$ , имеет максимум при некотором значении расстояния  $L=L^*$ , причём величина  $L^*$  зависит от массы налетающей частицы. Представлялось, что именно двухступенчатый механизм дефектообразования фактически неустраим, однако полученный результат указывает на определённые перспективы для решения означенной проблемы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. N.R. Ashurov, B.L. Oksengendler, S.E. Maksimov et al. //Modern Electr. Mater., 2017, [V.3, №1](#), P.1-25.
2. B.L.Oksengendler, N.R.Ashurov, S.E.Maksimov, M.I.Akhmedov, I.N.Nurgaliev. //Appl. Solar Energy, 2017, V.53, №4, P.326–333

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ.

В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х. Худойкулов,  
Б.Р. Кахрамонов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, им. У.А.  
Арифова АН РУз, Ташкент, Узбекистан

Проведенные экспериментальные исследования дугового разряда показали, что при высоких температурах катода более  $\sim 1800\text{K}$  на устанавливается форма разряда с распределенным катодным пятном. Плотность тока в таком пятне составляет  $15\text{-}20\text{ A/cm}^2$ , что существенно меньше, чем в известных типах катодных пятен  $10^5\text{-}10^7\text{ A/cm}^2$ , а по формуле Ричардсона-Дэшмана с учетом эффекта Шоттки ( $T_k - 2300\text{K}$ ) составляет  $10^{-2}\text{-}10^{-1}\text{ A/cm}^2$  и механизм эмиссии электронов остается неясным. Для дугового разряда с распределенным катодным пятном с плотностью тока  $10\text{-}100\text{ A/cm}^2$  необходимо действие факторов, существенно повышающих эффективность электронной эмиссии. Достижть необходимого уровня эмиссии электронов возможно при формировании сильного электрического поля образоваться ионами, осаждающимися на поверхность диэлектрических пленок, образующимися на поверхности катода в процессе разряда (окисные и др.) и образующиеся при взаимодействии плазмы разряда и окружающей среды с металлом (примесями). Условия динамического равновесие процессов можно записать

$$\frac{\text{кехр} \left( \frac{\Delta Q}{kT} \right)}{2x} = \frac{P}{10^{4,575} \sqrt{M/T}}.$$

Для пленок  $\text{SrO}_3$  оно достигается при температуре  $\sim 1000\text{ K}$ , что недостаточно для существования разряда с распределенным катодным пятном. Однако для  $\text{Sr}_2\text{O}_3$  (теплота испарения  $\Delta Q = 339,1\text{ кдж/мол}$ ) она смещается в область высоких температур  $2000\div 2200\text{K}$ . Таким образом, существование тонких диэлектрических пленок на поверхности катода, возможно только в определенном интервале температур и соответствующем давлении активных элементов в остаточной среде.

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ВАКУУМНОГО  
ДУГОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВНУТРЕННЕЮ  
ПОВЕРХНОСТЬ ТРУБ

В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х. Худойкулов,  
Б.Р. Кахрамонов  
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, им. У.А.  
Арифова АН РУз, Ташкент, Узбекистан

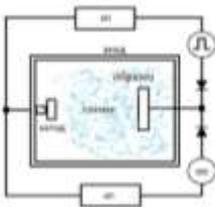
Для реализации управляемого технологического воздействия и нанесения покрытия потоками катодной плазмы вакуумного дугового разряда на внутреннюю поверхность трубы перспективно применение систем магнитной управления движением катодных пятен. Используя закономерности движения катодных пятен во внешнем неоднородном магнитном поле, осуществляется эффективная локализация катодных пятен магнитными полями их перемещение обеспечивает сканирование катодных пятен по внешней поверхности рабочей зоны катода. При горении дуги на движение катодного пятна оказывает влияние как сформированное магнитное поле, так и магнитное поле токового канала в плазме и тока, текущего по катоду. Катодные пятна перемещаются от поджигающего электрода в сторону токоподвода, имея составляющие как продольного перемещения в сторону токоподвода (носящие случайный характер), так и азимутальный компонент, обеспечивающий их вращение вокруг оси катода. Реализуя различные варианты управляемого перемещения катодных пятен дуги в «арочном» магнитном поле, например, бегущей волны, система позволяет, сканировать по поверхности катода и тем самым наносить покрытия материала катода на внутреннюю поверхность трубы. Разработанная конструкция вакуумно-дугового устройства с протяженным цилиндрическим катодом длиной 600мм, магнитной системой управления перемещением катодных пятен обеспечивает плазменную обработку и нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы диаметром 38 мм и высотой 600 мм. Неравномерность покрытия не превышала единиц процентов.

## ВАКУУМНО ДУГОВОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ИММЕРСИОННОГО ИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ

В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х. Худойкулов,  
Б.Р. Кахрамонов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, им. У.А.  
Арифова АН РУз, Ташкент, Узбекистан

Основными элементами технологической системы ионно-плазменного осаждения покрытий в режиме ионно-иммерсионного воздействия с ионной бомбардировкой являются, устройство формирования плазменного потока и на его основе плазменного эмиттера, генератора импульсного высокого напряжения, обеспечивающий режим короткоимпульсных потенциалов смещения на изделии, погруженном в плазму. Система ионно-иммерсионного осаждения сформирована на основе вакуумно-дугового источника плазмы с холодным катодом обеспечивающего создание плазменного эмиттера с высокой однородностью на выходе; значительной долей атомарных ионов 8-10% и высокой энергоэффективностью процесса генерации плазменного потока. Высокая стойкость к тепловой нагрузке элементов генератора плазмы, достигнута конструктивным решением катодного узла, разрядного канала. Система обеспечивает эффективное воздействие на поверхность изделия в процессе нанесения покрытий методом погружения в плазму. Процесс осуществляется следующим образом. На поверхность изделия, предварительно очищенную, нагретую до 400-500°С. ионной бомбардировкой из плазмы материала катода, осуществляют осаждение покрытия на его поверхность в условиях импульсного высокочастотного потенциала смещения, подаваемого с длительностью импульса -  $0.12 \cdot 10^{-6}$  мин., частотой следования импульсов -  $10^5$  Гц, амплитудой потенциала смещения до 1.5 кВ. Поток ионов титана нагревает образец до необходимой температуры.



Поток ионов титана нагревает образец до необходимой температуры.

*IN SITU* ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В СПЛАВЕ  
Ti-6Al-4V, ПОЛУЧЕННОМ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-  
ЛУЧЕВОГО СПЛАВЛЕНИЯ

М.Н. Бабихина, М.С. Сыртанов, Е.Б. Кашкаров, Н.С. Пушилина,  
В.Н. Кудияров  
Национальный исследовательский томский политехнический  
университет, Томск, Россия

С внедрение новых технологий в производство титановых сплавов, вопросы, связанные с водородным охрупчиванием, остаются по-прежнему актуальными. Поскольку в процессе синтеза изделий из титановых сплавов с помощью аддитивных технологий, скорость охлаждения материала очень высокая, происходит формирование различных дефектов, анизотропных структур и т.д. Такие особенности структуры материала могут приводить к изменению характера взаимодействия материала с водородом. Поскольку на процессы поглощения водорода материалом существенное влияние оказывает структурно-фазовое состояние материала. Целью настоящей работы являлось *in situ* синхротронные исследования эволюции структурно-фазового состояния образцов, изготовленных методом электронно-лучевого сплавления из порошка Ti-6Al-4V, при насыщении водородом. Исследования проводились методами дифрактометрии с использованием источника синхротронного излучения в специализированной лаборатории «Прецизионная дифрактометрия II» Института катализа СО РАН. Насыщение образцов водородом проводилось при температуре 650 °С до концентрации 0,3 масс.%. Запись дифрактограмм осуществлялось ежеминутно в процессе нагрева, гидрирования и охлаждения с шагом в 6 °С. Интерпретация полученных результатов и идентификация максимумов проводилась с применением программ PDF-2-search-match, FullProf, Crystallographica. Установлено, что в процессе наводороживания происходит фазовая трансформация по следующему пути:  $[\alpha (\alpha'', \omega) + \beta] \rightarrow [\alpha(\alpha_2) + \beta]$ .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, номер проекта 17-79-2010.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ДИФФУЗИИ ДЕЙТЕРИЯ В ЩЕЛОЧНЫХ  
МЕТАЛЛАХ

В.Б. Выходец<sup>1)</sup>, Т.Е. Куренных<sup>1)</sup>, С.И. Обухов<sup>1)</sup>, О.А. Нефедова<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>2)</sup> Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Для водорода отсутствуют данные по диффузии в щелочных металлах (ЩМ). Это связано с тем, что ЩМ обладают высокой химической активностью и разрушаются при отжиге в водородосодержащих средах. В работе разрабатывался подход для измерения коэффициентов диффузии дейтерия  $D$  в ЩМ, основанный на использовании методики ядерного микроанализа в режиме онлайн (NRAOL). В ее рамках атомы дейтерия вводятся в образец с помощью ионной имплантации, одновременно проводится диффузионный отжиг образца в вакуумной камере ускорительной установки и измерение концентрационного профиля  $C(x)$  атомов дейтерия в образце с помощью реакции  ${}^2\text{H}(d,p){}^3\text{H}$ . Ранее с помощью измерений на тестовом материале никеле было показано, что NRAOL обеспечивает получения корректных значений  $D$ . Специфика измерений на ЩМ состоит в их быстром окислении на воздухе. В связи с этим, была разработана технология, при использовании которой ЩМ помещается в герметичный держатель образцов в боксе с низким парциальным давлением кислорода, затем держатель переносится в камеру ускорителя и вскрывается при достижении в ней высокого вакуума. Эта технология обеспечила приемлемую для NRAOL степень окисления ЩМ. Исследования на K и Li дали отрицательные результаты, и только для Na были получены профили  $C(x)$ , не искаженные конкурирующими ядерными реакциями. Значения  $D$  для Na были близки к таковым для других металлов с ГПУ решеткой.

Работа выполнялась при финансовой поддержке проекта РФФИ № 17-03-00101.



## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Стр.

**А**

Абдувайитов А.А.	80
Агуреев Л.Е.	111
Александров В.А.	27
Алексеев В. И.	32, 42
Амбарцумов В.В.	28
Амрастанов А.Н.	63
Андреев В.В.	65
Андреев Д.В.	65
Андрианов В.А.	37
Андрианова Н.Н.	56
Аникин В.А.	146
Аникин К.А.	111
Антонов А.В.	22
Арустамов В.Н.	131-135
Атабаев Б.Г.	88-90, 142
Афанасьев В.П.	69
Ахмедов М.И.	140
Ашуров Н.Р.	140
Ашуров Х.Б.	131-135

**Б**

Бабенко П.Ю.	50-51
Бакаев А.В.	14, 129
Бакаева А.М.	129
Балакшин Ю.В.	147, 154
Бекпулатов И.Р.	136-137
Белкова Ю.А.	10, 71
Белов А.И.	124, 145
Березюк А.И.	155
Блажевич С.В.	33, 41
Бобрович О.Г.	107, 112
Богданов О.В.	31
Болтаев Х.Х.	80-81
Бондаренко Г.Г.	65, 121-122
Борисов А.М.	56, 111, 146
Боровицкая И.В.	117
Бритвич Г.И.	18
Бронский В.С.	74

Буга С.Г.	61-62
Букунов К.А.	152
Буреев О.А.	96-97
Бушкевич И.А.	107

**В**

Васильев А.Э.	55
Васильев В.К.	123
Вдовин В.И.	22
Вершинин Г.А.	125
Виноградов А.В.	111
Вирус А.А.	20
Внуков И.Е.	35, 45
Волков В.И.	43
Волков Н.В.	72-73, 120
Володин В.А.	22
Воронина Е.Н.	70, 77
Востриков В.Г.	111
Вохмянина К. А.	15
Вуколов А.В.	38, 44
Высоцкий В.И.	9, 13
Высоцкий М.В.	13
Выходец В.Б.	105-106
Выходец Е.В.	106

**Г**

Гайдар А.И.	121
Гладышев Ю.А.	64
Гоголев С.Ю.	39
Гонгальский М.Б.	60
Гопонов Ю.А.	35, 45
Грибков В.А.	121-122
Грязев А.С.	69
Гулямова С.Т.	87
Гусева Д.Г.	130

**Д**

Данилов А.В.	152
Данилов Ю.А.	123
Демин А.С.	121
Джаббарганов Р.	88-90, 142
Джемилев Н.Х.	86
Джурахалов А.А.	52, 93
Дидык А.Ю.	118

Дмитриевский А.А.	130
Донаев Б.Д.	139
Донаев С. Б.	82, 138
Дорожко А.В.	113
Дубинко А.В.	79, 129
Дуда Е. В.	53
Дурум А.А.	18
Дьяков И.Г.	101

**Е**

Евсеев А.П.	60, 153-154
Егоров В.К.	108
Егоров Е.В.	108
Елисеев А.Н.	32, 42
Епифанов Н.А.	122
Ерзинкян А.Л.	37
Ерискин А.А.	118
Ермаков Ю.А.	3
Ермоленко А.А.	61
Ефремова Н.А.	148
Ефремова Н.Ю.	130

**Ж**

Жидков М. В.	96-97
Жукова П.Н.	32
Журкин Е.Е.	14, 79, 129

**З**

Загороднюк Р.А.	33
Звонков Б.Н.	123
Злоцкий С.В.	114
Зырянов С.С.	155

**И**

Ибрагимова Б.В.	139
Ибрагимова Б.	87
Иванова И.А.	4-5
Ивацук О. О.	8, 15, 36, 40
Ивлева Л.И.	37
Иешкин А.Е.	3
Имаметдинов Э.Ш.	96-97
Иониди В.Ю.	40
Иррибарра Э. Ф.	32, 42

**К**

Кабышев А.В.	143
Калашников Н.П.	28
Калин Б.А.	120
Калманович В.В.	64
Каплий А. А.	15
Капля П.С.	69
Каплин В.В.	38
Карабешкин К.В.	54, 100, 151
Карасёв П.А.	54, 100, 151
Карагаев П.В.	38
Каргина Ю.В.	60
Карпов В.А.	32, 42
Квасов Н.Т.	115
Киреев Д.С.	3
Кишин И.А.	32, 42
Кленин А.А.	8, 40
Клюев А.С.	32, 42
Кобзев А.П.	118
Ковивчак В.С.	126-127, 144
Кожемяко А.В.	147, 154
Козловский В.В.	55
Колесников Н.Н.	110
Колобов Ю.Р.	96-97
Комаров Ф.Ф.	112
Конусов Ф.В.	143
Кореневский Е.Л.	115
Корнилова А.А.	16
Корнич Г. В.	53, 61-62
Коровушкин В.В.	20
Королев Д.С.	124, 145
Коротеев Ю.М.	150
Костин М.Ю.	18
Костишин В.Г.	20
Кощеев В.П.	23
Кристя В.И.	66-67
Крит Т.Б.	16
Кружалов А.В.	155
Кряжев Ю.Г.	126
Кубанкин А.С.	8, 18, 32, 36, 40, 42-43
Кудрин А.В.	123
Кудрявцев Ю.	68

Кудюкин А.И.	128
Кукушкин С.А.	108
Куликаускас В.С.	110, 118
Курбанов М.К.	88-90,142
Курбанов С.С.	88-90, 142
Куренных Т.Е.	105-106
Кушкина К.Д.	60, 152, 154

**Л**

Лактионова С.А..	35, 45
Ларикова Э.А	11
Латышев С.В.	121
Лигачев А.Е.	96-97
Лигачева Е.А.	97
Лопатина О.В.	148
Лыков П.А.	37
Лысова И.В.	27

**М**

Маишеев В. А.	18
Максимов С.Е.	86, 140
Максюта Д.Н.	9
Максюта Н.В.	9, 17
Малашевич А.А.	114
Мальшевский В.С.	4-5
Маргыш Е.В.	9
Масленникова О.М.	19
Масляев С.А.	121-122
Матыс В.Г.	113
Машкова Е.С.	56, 146
Мелузова Д.С.	50
Миннебаев Д.К	152-153
Мирошник В.С.	43
Михайлов А.Н.	109, 124, 145
Михайлов Б.П.	117
Михайлов М.М.	12
Михайлова А.Б.	117
Михеев Н.Н.	21
Мишунин М.В.	8, 40
Моос Е.Н.	128
Моргун Д.А.	23
Морковкин А.И.	146
Морозов Е.В.	122

Муратова Е.Н.	153
Мусин А.И.	75-76
Мустафоева Н.М.	141
Мэняю У.	149

**Н**

Нажмудинов Р.М.	18, 32, 42
Назаров А.В.	154
Немцев А.И.	99
Нефедова О.А.	106
Нешов Ф.Г.	155
Нещименко В.В.	12
Никифорова Н.А.	21
Никольская А.А.	124
Никонов Э.Г.	119
Никулин В.Я.	117-118
Никулин И.С.	36
Ниматов С.Ж.	83-85
Новиков Л.С.	70
Новиков Н.В.	10
Нормуродов Д.А.	59
Носков А.В.	33, 41

**О**

Обухов С.И.	106
Овчинников М.А.	56, 146
Овчинников П.Н.	130
Оксенгендлер Б.Л.	140
Окулич В.И.	145
Окулич Е.В.	145
Олейник А.Н.	8, 36, 40, 43
Олейников И.В.	73
Ольчак А.С.	28
Осипов А.В.	108

**П**

Павлов С.К.	143
Павлуш М.	119
Палагушкин А.Н.	110
Панина Т.А.	23
Панова Т.В.	127, 144
Пивоваров Ю.Л.	31
Пименов В.Н.	121-122
Питиримова Е.А.	123, 146
Подсвиров О.А.	99

Поздеева Э.В.	148
Поплавский В.В.	112-113
Попов В.П.	22
Поповичова М.	119
Потемкин Г.В.	96-97
Потылицын А.П.	39
Привезенцев В.В.	110
Пузынин И.В.	49
Пузынина Т.П.	49
Пустовит А.Н.	94-95

**Р**

Рахимов А.М.	136
Рахимова Т.В.	70
Ремнев Г.Е.	115, 143
Ротт А.Т.	128
Рузибаева М.К.	82
Руми Д.С.	84,
Рыбин Н.Б.	128
Рысбаев А.С.	136-137
Рябухин О.В.	155

**С**

Сабиров А.С.	25, 93
Савичкин Д.О.	66
Савушкина С.В.	56, 111
Саидахмедова З.Р.	81, 84, 137
Самойлов В.Н.	75-76
Самойлов В.П.	73
Сафонов Д.А.	72-73, 120
Святкин Л.А.	148-150
Севостьянова В.С.	101
Семина В.К.	118
Серегина Е.В.	63
Серов А.А.	117
Сибирев А.Л.	19
Сиднин М.А.	35, 45
Сиднина И.Р.	35
Сидоров А.И.	99
Силин П.В.	117
Силкин В.М.	116
Скуратов В.А.	110, 114
Смирнова А.И.	19

Соболев Н.А.	151
Содикжонов Ж.Ш.	87
Солодухин И.А.	114
Сотников А. В.	15
Сотникова В. С.	15
Стельмах В.Г.	91-92
Степаненко В.Ю.	96
Степанов А.В.	7, 26-27
Степанов В.А.	128
Степович М.А.	19-21. 63-64
Столяров А.А.	65
Стручков А.И.	54
Сухих Л.Г.	38, 44
Сысоева Н.В.	73
Сычева А.А.	77
Сыщенко В.В.	11

**Т**

Татаринцев А.А.	152
Ташатов А.К.	59, 141
Ташлыкова-Бушкевич И.И.	107
Ташмухамедова Д.А.	59, 89, 138
Теплова Я.А.	10, 71
Терентьев Д.А.	14, 79, 129
Терещенко А.Н.	110, 124, 151
Тетельбаум Д.И.	109, 124, 145
Тихонов А.И.	20
Титов А.И.	54, 100, 151
Ткаченко Н.В.	111
Толмачев А. И.	78
Трофименко С.В.	18, 24
Тукфатуллин О.Ф.	86
Тухлиев З.К.	49
Тухфатуллин Т.А.	31
Тысченко И.Е.	109
Тюрин Ю.И.	116

**У**

Углов В.В.	114-115
Углов С.Р.	38, 44
Умаров Ф.Ф.	52
Умиряков Б.Е.	57, 82, 85, 138-139, 141
Усольцева Н.В.	19

**Ф**

Файзуллаев Р.Ф.	137
Филиппов Г.М.	27
Филиппов М.Н.	63
Фомин Г.В.	4-5
Форлано Л.	78

**Х**

Хайриддинов Б.Э.	136
Хожиев Ш.Т.	86
Христов И.Г.	49
Христова Р.Д.	49
Худойкулов И.Х.	131-135
Хужаниязов Ж.Б.	136-137
Хусаинов М.Р.	155

**Ч**

Чепурнов А.С.	8, 40
Черненко Д.Н.	56
Черненко Н.М.	56
Чернов И.П.	116, 148-150
Черноок Т.Н.	127, 144
Черныш В.С.	3, 60, 147, 152
Чесноков Ю.А.	18
Чеченин Н.Г.	152

**Ш**

Шавкин С.В.	117
Шарипов З.А.	49
Шаропов У.Б.	88-90, 142
Шагохин Р.А.	35, 45
Шевцов М.А.	100
Шемухин А.А.	60, 147, 152-154
Шепелевич В.Г.	107
Шергин А.П.	50-51
Шилобреева С.Н.	74
Шиманский В.И.	115
Шипко М.Н.	19-20
Широкорад Д.В.	62
Шкуропат Д.О.	41
Штанов Ю.Н.	23
Штейнман Э.А.	110, 124
Шуйский Р.А.	145
Шуклинов А.В.	130

188

Шульга В.И. 102  
Шульга Н.Ф. 18, 24

### **Щ**

Щагин А.В. 8, 18, 34, 36, 40, 43  
Щербачев К.Д. 110

### **Э**

Эпельфельд А.В. 111  
Эргашов Ё.С. 139

### **Ю**

Юрина У.В. 99

### **Я**

Ядгаров И.Д. 92  
Якименко А.Н. 55  
Янович А.А. 18  
Яшин А.С. 72, 120

### **A**

Asomoza R. 58  
Abadias G. 114

### **C**

Chechenin N.G. 6

### **D**

Djurabekova F. 54

### **E**

Escoboza A. 68  
Elsehly E.M.I. 6

### **G**

Golobkov N.N. 98

### **H**

Hernandez A. 58

### **K**

Kolobov Yu.R. 98  
Koval N.N. 98  
Kudriavtsev Yu. 58  
Kudryavsteva O. 68  
Kushkina K.D. 6  
Kuronen A. 54

### **L**

Lepakova O. K. 98  
Ligachev A.E. 98

### **M**

Maksimov Y.M.	98
Makunin A.V.	6
Motaweh H.A.	6
<b>N</b>	
Nordlund K.	54
Nikishin S.	68
<b>P</b>	
Potemkin G.V.	98
<b>S</b>	
Shemukhin A. A.	6
<b>T</b>	
Teresov A.D.	98
<b>U</b>	
Ullah M.W.	54
<b>Z</b>	
Zhidkov M.V.	98



*Научное издание*

Тезисы докладов XLVIII международной конференции  
по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами

Под общей редакцией проф.М.И. Панасюка

Редколлегия: Ю.А. Ермаков, В.С.Куликаускас, Е.С.Машкова,  
А.М. Борисов, А.С. Кубанкин, В.С. Черныш, Н.Г. Чеченин

Редактор Ю.А. Ермаков