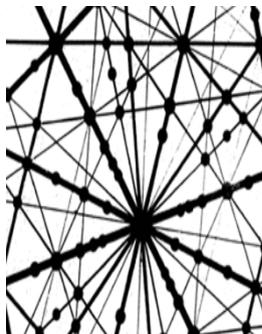


МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**  
***XLV международной Тулиновской конференции***  
**ПО ФИЗИКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**  
**ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С КРИСТАЛЛАМИ**

(Москва 26 мая – 28 мая 2015)



Москва 2015

УДК 539.1.01.08

ББК 22.37.

T29

Под общей редакцией проф. М.И. Панасюка  
Редколлегия: Ю.А. Ермаков, В.С. Куликаускас, Е.С. Машкова,  
Г.П. Похил, В.С. Черныш, Н.Г. Чеченин

T29 Тезисы докладов XLV международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Под ред. проф. М.И. Панасюка. – М.: Университетская книга, 2015. – 189 с.

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

## Секция I

### ФИЗИКА ОРИЕНТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

26 мая, вторник, 10<sup>30</sup> – 12<sup>00</sup>

I утреннее заседание

Председатель М.И. Панасюк

Вступительное слово – профессор **М.И. Панасюк**

- 1. Фомин С.П., Мельник Ю.П., Пилипенко В.В., Фомин А.С., Шульга Н.Ф.**  
Волна медленного ядерного горения в реакторе на быстрых нейтронах (30 мин) 3
- 2. Пивоваров Ю.Л.**  
Эффект Огорокова - когерентное возбуждение быстрых многозарядных ионов в кристаллах: 50 лет исследований (30 мин) 4

12<sup>00</sup> – 12<sup>30</sup> обсуждение стендовых докладов

26 мая, вторник, 12<sup>30</sup> – 14<sup>00</sup>

II утреннее заседание

Председатель Г.П. Похил

- 1. Петухов В.П., Петухов М.В.**  
Исследование прохождения электронов через диэлектрические трубки (15 мин) 5
- 2. Богданов О.В., Пивоваров Ю.Л., Фикс Е.И.** Излучение каналированных релятивистских тяжелых ионов в оптическом диапазоне (15 мин) 6
- 3. Ерохин К.М., Калашников Н.П.**  
Квазиклассический подход к интерпретации эффекта Баркаша (15 мин) 7
- 4. Белкова Ю.А., Новиков Н.В., Теплова Я.А.** Неупругие потери энергии ионов в процессе перезарядки (15 мин) 8

14<sup>00</sup> – 15<sup>00</sup> перерыв на обед

Стеновые доклады

1. **Левшунова В.Л., Похил Г.П., Тетельбаум Д.И.** Модель эффекта дальнего действия. 9
2. **Высоцкий В.И., Высоцкий М.В.** Эффект наноскорения частиц в межатомной потенциальной яме и особенности реакций с их участием при формировании когерентного коррелированного состояния. 10
3. **Трофименко С.В., Шульга Н.Ф.** Интерференционные эффекты в ионизационных потерях электрон-позитронной пары на больших расстояниях от точки ее рождения. 11
4. **Вохмянина К.А., Левина В.С., Кищин И.А., Кубанкин А.С., Нажмудинов Р.М., Олейник А.Н., Сотников А.В., Похил Г.П.** Экспериментальное исследование возможности бесконтактного взаимодействия пучков электронов со структурированными поверхностями. 12
5. **Вохмянина К.А., Левина В.С., Кищин И.А., Кубанкин А.С., Нажмудинов Р.М., Олейник А.Н., Сотников А.В., Похил Г.П.** Прохождение электронов с энергией 10 кэВ через стеклянные макрокапилляры конической формы. 13
6. **Павленко В.И., Едаменко О.Д., Черкашина Н.И., Носков А.В.** Процессы торможения низкоэнергетического электрона в тяжелом высоконаполненном полимерном композите. 14
7. **Шульга Н.Ф., Сыщенко В.В., Тарновский А.И., Исупов А.Ю.** Структура собственных функций электрона в квантовой теории аксиального каналирования. 15
8. **Силенко А.Я.** Особенности движения спина заряженных квазичастиц в кристаллах. 16
9. **Коцеев В.П., Штанов Ю.Н., Моргун Д.А., Панина Т.А.** Моделирование процесса отклонения релятивистских электронов изогнутым кристаллом кремния. 17
10. **Горошко М.А., Степанов С.Е.** Определение характеристик спектров рассеяния нейтронов на вольфраме с использованием вейвлетов. 18

11. **Басков В.А.** Влияние температуры кристалла на параметры электромагнитного ливня. 19
12. **Белкова Ю.А., Теплова Я.А.** Пробеги легких ионов в ядерной фотоэмульсии. 20
13. **Калашников Н.П.** Нелинейное комбинационное рассеяние фотонов (рамановского типа) каналированной частицей. 21
14. **Новиков Н.В., Теплова Я.А.** Влияние захвата и потери двух электронов на зарядовое распределение ионов. 22
15. **Авакян Л.А., Жилина Т.И., Малышевский В.С., Фомин Г.В.** Моделирование рассеяния нейтральных атомов поверхностью кристалла при скользящих падениях. 23
16. **Дудкин Г.Н., Кузнецов С.И., Ломаев М.И., Нечаев Б.А., Падалко В.Н., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф., Шувалов Е.Н., Бондаренко С. В.** О влиянии процесса полевой ионизации на эффективность генерации нейтронов. 24
17. **Коротченко К.Б., Пивоваров Ю.Л., Эйхорн Ю.Л.** Динамика волнового пакета протона при плоскостном каналировании в кристалле Si. 25
18. **Святкин Л. А., Лопатина О.В., Коротеев Ю.М., Чернов И.П.** Совместное влияние водорода и гелия на электронную структуру циркония. 26
19. **Чернов И.П., Силкин В.М.** Динамические колебания валентной электронной плотности в  $PdHx$  при внешнем воздействии. 27
20. **Александров В.А., Сабиров А.С.** Исследование особенностей каналирования атомных частиц в жгутах нанотрубок методом компьютерного моделирования. 28
21. **Александров В.А., Сабиров А.С.** Роль вакансий и адсорбированных атомов при каналировании молекулярных частиц в унт. 29
22. **Иванов А.В.** Взаимодействие заряженных частиц с цепочкой атомов углерода. 30
23. **Лысова И.В., Михайлов А.Н.** Энергетические характеристики каналирования атомарного пучка в нанотрубках. 31
24. **Михайлов Ф.Н.** Оптимизация параметров при самосборке ЛЦУ методом молекулярной динамики в силовом поле «ReaxFF». 32

25. **Степанов А.В.** Влияние упругих возмущений стенки углеродной нанотрубки с учетом возмущения электронной подсистемы на каналирование в ней медленных атомных частиц. 33
26. **Филиппов Г.М., Сабиров А.С.** Поляризация углеродной нанотрубки движущимся зарядом и ее влияние на каналирование. 34
27. **Джурахалов А.А., Стельмах В.Г., Ядгаров И.Д.** Рассеяние атомов водорода на графене. 35
28. **Максюта Н.В., Высоцкий В.И., Ефименко С.В.** Исследование спирального каналирования нейтральных частиц в углеродных нанотрубках. 36
29. **Кириллин И.В.** О вероятности процессов, связанных с близкими столкновениями, при отклонении заряженных частиц изогнутым кристаллом. 37
30. **Шемухин А.А., Макунин А.В., Самигуллин Р.Ш., Муратова Е.Н.** Исследование транспортировки ионных пучков гелия в нанопористых матрицах. 38
31. **Похил П.Г., Куликаускас В.С., Журухина А.В., Труханов К.А.** Воздействие на живую клетку ударной волны, рождаемой быстрой частицей 39

Секция II**ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ В ТВЁРДОМ ТЕЛЕ**26 мая, вторник, 15<sup>00</sup> – 16<sup>30</sup>I вечернее заседаниеПредседатель В.К. Гришин

1. **Алексеев В.И., Елисеев А.Н., Иррибарра Э., Кищин И.А., Кубанкин А.С., Нажмудинов Р.М., Никулин И.С., Сергиенко В.И.** Поляризаационное тормозное излучение релятивистских электронов в текстурированных поликристаллах. (15 мин) 42
2. **Мальшевский В.С., Иванова И.А.** Переходное излучение ионов при подхвате или потере электронов на границе раздела двух сред (15 мин) 43
3. **Вуколов А.В., Новокшенов А.И., Потылицын А.П., Мурадян Т.Р., Мовсисян А.Е., Кочарян В.Р.** Влияние температурного градиента на спектр дифрагированного рентгеновского излучения в кристалле кварца. 44  
**Вуколов А.В., Новокшенов А.И., Потылицын А.П., Мурадян Т.Р., Хлопузян С.Г., Кочарян В.Р.** Спектр проходящего рентгеновского излучения в кристалле кварца под воздействием температурного градиента. (Объединённый доклад 30 мин) 45
4. **Абдрашитов С.В., Бордовицын В.А., Пивоваров Ю.Л., Тухфатуллин Т.А.** Угловой момент излучения релятивистских электронов при каналировании в тонком кристалле Si. (15 мин) 46

16<sup>30</sup> – 17<sup>00</sup> обсуждение стендовых докладов

26 мая, вторник, 17<sup>00</sup> – 18<sup>45</sup>II вечернее заседаниеПредседатель А.С. Кубанкин

1. **Бабаев А.А., Кавото Ж.-Л., Дабагов С.Б.** Отклонение заряженных частиц мискат-поверхностью ориентированного кристалла. (15 мин) 47
2. **Богданов О.В., Пивоваров Ю.Л., Такабаяши Ю., Тухфатуллин Т.А.** Особенности спектрально-угловых распределений излучения и рассеяния электронов при каналировании в HWC Si. (15 мин) 48
3. **Блажевич С.В., Коськова Т.В., Носков А.В.** Влияние расходимости электронного пучка, пересекающего монокристаллическую пластинку, на спектрально-угловые характеристики когерентного рентгеновского излучения. (15 мин) 49
4. **Внуков И.Е., Выходцева М.В., Гопонов Ю.А., Лактионова С.А., Плигина О.О., Сиднин М.А.** Об определении параметров пучков электронов сверхвысоких энергий с помощью ориентированных кристаллов. (15 мин) 50
5. **Фомин А.С., Фомин С.П., Шульга Н.Ф.** Когерентное тормозное излучение "полууголого" электрона в тонком кристалле. (15 мин) 51

Стендовые доклады

1. **Иващук О.О., Олейник А.Н., Кубанкин А.С., Щагин А.В.** О применении пирозлектрического эффекта в ускорителях заряженных частиц. 52
2. **Кищин И.А., Аль-Омари М., Кубанкин А.С., Нажмудинов Р.М., Сергиенко В.И.** Источник вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена на основе взаимодействия пучка быстрых электронов с плоской мишенью в скользящей геометрии. 53

3. **Калашников Н.П., Мазур Е.А.** Излучение каналированной частицы в двух-ямном потенциале как критический эксперимент о наличии или отсутствии зон. 54
4. **Калашников Н.П., Ольчак А.С.** Ориентационная зависимость рождения и аннигиляции электрон-позитронных пар в монокристалле при высоких энергиях. 55
5. **Калашников Н.П., Ольчак А.С.** Классические эффекты при рассеянии гамма-квантов высоких энергий на монокристалле. 56
6. **Мазур Е.А.** Проявление спектра возбуждений кристалла в излучении ориентированной частицы. 57
7. **Углов С.Р., Вуколов А.В., Каплин В.В., Сухих Л.Г.** Исследование ВУФ излучения 5,7 МэВ электронов вблизи L-края поглощения Al. 58
8. **Максюта Н.В., Высоцкий В.И., Ефименко С.В.** Методика расчета уровней энергии и волновых функций в изолированных плоскостных и осевых потенциалах в рамках теории возмущений. 59
9. **Максюта Н.В., Высоцкий В.И., Ефименко С.В.** Излучение частиц при каналировании в главных заряженных осях кристаллов со структурой цинковой обманки. 60
10. **Блажевич С.В., Коськова Т.В., Немцев С.Н., Носков А.В.** Развитие динамической теории параметрического рентгеновского излучения релятивистского электрона в периодической слоистой среде в условиях многократного рассеяния. 61
11. **Блажевич С.В., Гладких Ю.П., Загороднюк Р.А., Немцев С.Н., Носков А.В.** Когерентное рентгеновское излучение релятивистского электрона в трехслойной структуре «аморфный слой-вакуум-периодическая слоистая среда». 62

**Секция III****ПОВЕРХНОСТЬ, РАССЕЯНИЕ, РАСПЫЛЕНИЕ, ЭМИССИЯ  
ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ И РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ****27 мая, среда, 10<sup>00</sup> - 11<sup>30</sup>****Утреннее заседание****Председатель В.С. Черныш**

1. **Ковивчак В.С., Панова Т.В., Попов А.В.** Модификация поликристаллических оксидов металлов под действием мощного ионного пучка. 65  
**Ковивчак В.С., Кряжев Ю. Г., Мартыненко Е.С.** Воздействие мощного ионного пучка на тонкие слои полимерных композитов, нанесенные на диэлектрические подложки. (Объединённый доклад 30 мин) 66
2. **Новиков Л.С., Черник В.Н., Жилияков Л.А., Воронина Е.Н., Беляева Н.А.** Стойкость полиимидных пленок к последовательному облучению протонами низкой энергии и кислородной плазмой. (15мин) 67
3. **Барат А.А., Манухин В.В.** Расчет энергетических спектров распыления двухкомпонентных мишеней потоками легких ионов и плазмы. (15 мин) 68
4. **Андрянова Н.Н., Борисов А.М., Казаков В.А., Машкова Е.С., Питиримова Е.А., Попов В.П.** Структура и проводящие свойства поверхности алмаза при высокодозовом ионном облучении. (15 мин) 69
5. **Подсвиров О.А., Карасёв П.А., Шубина Е.Н., Мишин М.В., Поздняков А.В., Виноградов А.Я., Просников М.В., Карасёв Н.Н., Титов А.И.** Влияние примеси бора на свойства алмазоподобных пленок. (15 мин) 70

11<sup>30</sup> – 12<sup>15</sup> обсуждение стендовых докладов

27 мая, среда, 12<sup>15</sup> – 14<sup>00</sup>

II утреннее заседание

Председатель А.М. Борисов

1. **Иешкин А.Е., Киреев Д.С., Ермаков Ю.А., Черныш В.С.** Планаризация поверхности материалов газовыми кластерными ионами. (15 мин) 71
2. **Карабешкин К.В., Карасёв П.А., Титов А.И.** Накопление структурных нарушений у поверхности Si при имплантации молекулярных ионов. (15 мин) 72
3. **Тыщенко И. Е., Ávila T.S., Grande P.L., Попов В.П.** Исследование слоев SiGe-на-изоляторе нанометровой толщины методом рассеяния ионов средних энергий. (15 мин) 73
4. **Балакшин Ю.В., Шемухин А.А., Назаров А.В., Черныш В.С., Кожемяко А.В., Erich M., Petrović S.** Влияние канализирования на профиль распределения примеси и радиационно-стимулированных дефектов при имплантации в монокристалл кремния. (15 мин) 74
5. **Пашков И.Н., Лигачева Е.А., Лигачев А.Е.** Влияние ионной обработки на свойства поверхности графита. (15 мин) 75
6. **Воробьев В.В., Осин Ю.Н., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Степанов А.Л.** Модификация структуры поверхности кремния при имплантации ионами серебра. (15 мин) 76

14<sup>00</sup> – 15<sup>00</sup> перерыв на обед

Стендовые доклады

1. **Вахитов И.Р., Нуждин В.И., Рамеев Б.З., Шемухин А.А., Тагиров Л.Р., Хайбуллин Р.И.** Структурные и магнитные исследования рутила (TiO<sub>2</sub>), имплантированного ванадием. 77
2. **Гумаров А.И., Дулов Е.Н., Тагиров Л.Р., Гильмутдинов И.Ф., Лядов Н.М., Валеев В.В., Хайбуллин Р.И., Маскова А.** Исследования структурных и магнитных свойств ZnO, имплантированного железом. 78
3. **Кристья В.И., Савичкин Д.О., Фишер М.Р.** Моделирование распыления катода в слаботочном газовом разряде в смеси аргона с парами ртути. 79
4. **Поляков А.Н., Степович М.А., Туртин Д.В.** Определение подвижности свободных экситонов в нитриде галлия катодоллюминесцентным методом. 80

5. **Серегина Е.В., Степович М.А., Макаренков А.М., Филиппов М.Н.** О некоторых проблемах моделирования распределения неосновных носителей заряда, генерированных электронным пучком в полупроводниковом материале. 81
6. **Афанасьев В.П., Капля П.С.** Корректирующие коэффициенты методики «straight line approximation» в рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. 82
7. **Афанасьев В.П., Капля П.С.** Малоугловое приближение и точное численное решение для функции пропускания. 83
8. **Афанасьев В.П., Грязев А.С., Капля П.С., Ляпунов Н.В.** Восстановление дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов по спектрам РФЭС и ХПЭ. 84
9. **Мусин А.И., Самойлов В.Н.** О значениях показателя степени в зависимости коэффициента распыления от энергии связи при эмиссии атомов с грани (001) Ni. 85
10. **Самойлов В.Н., Мусин А.И.** О наблюдаемости перефокусированных распыленных атомов при эмиссии с поверхности грани (001) Ni. 86
11. **Толмачев А.И.** Угловое распределение отраженных частиц при скользящем падении на поверхность мишени. 87
12. **Хамдохов Э.З., Тешев Р. Ш., Хамдохов З.М., Калажоков В.С., Калажоков Х.Х., Куликаускас В.С., Ерискин А.А.** Свойства хромоникелевого сплава после воздействия пучка ионов углерода. 88
13. **Борисовский П.А., Гаврилов С.В., Моос Е.Н., Савушкин О.В.** Квантовомеханическое обоснование парных взаимодействий частиц при распылении поверхности. 89
14. **Борисовский П.А., Киселев Г.В., Наумкин А.В., Моос Е.Н.** Изменение состояния поверхностных атомов в потоке заряженных частиц. 90
15. **Морозов С.Н., Расулев У.Х.** Эффективность использования многозарядных бомбардирующих ионов для ВИМС. 91
16. **Дуда Е.В., Корнич Г.В.** Моделирование динамики кластера Cu<sub>3</sub> на поверхности Cu(100) со ступенью. 92
17. **Ермоленко А.А., Корнич Г.В., Буга С.Г.** Молекулярно-динамическое моделирование распыления металлических кластеров на поверхности полиэтилена низкоэнергетическими ионами. 93
18. **Корнич Г. В.** Моделирование низкоэнергетического распыления металлических кластеров на поверхности (0001) графита. 94

19. Широкоград Д.В., Корнич Г.В. Моделирование биметаллических кластеров под действием низкоэнергетической бомбардировки ионами Ag. 95
20. Vochkareva E.S., Nikonov N.V., Podsvirov O.A., Prosnikov M.A., Sidorov A.I. The formation of sodium nanoparticles in sodium-silicate glasses under the action of electron beam and thermal treatments. 96
21. Потемкин Г. В., Лигачев А. Е., Жидков М. В., Колобов Ю. Р., Ремнев Г. Е., Смолякова М. Ю., Божко С. А. Изменение рельефа поверхности магния под действием мощных импульсных потоков ионов водорода и углерода. 97
22. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Шульга В.И. Эрозия поверхности волокон углерод-углеродных композитов при высокодозной ионной бомбардировке. 98
23. Батгэрэл Б., Дидык А.Ю., Ленивенко В.В., Никонов Э.Г., Никонова О.К., Пузынин И.В., Пузынина Т.П. Математическое моделирование процессов формирования газовых нанокластеров на примере ксенона 99
24. Данилов Ю.А., Дудин Ю.А., Кудрин А.В., Лесников В.П., Петрякова Е.В., Питиримова Е.А., Якубов Р.Р. Формирование слоев InFeAs и их модификация с помощью ионной имплантации. 100

**Секция IV****МОДИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТИ****27 мая, среда, 15<sup>00</sup> – 16<sup>30</sup>****1 вечернее заседание****Председатель В.В. Углов**

1. **Дидык А.Ю.** Ядерные реакции в плотном ксеноне при давлении 270 бар, облученном тормозными гамма-квантами с пороговой энергией 10 МэВ (15 мин). 103
2. **Ташлыкова-Бушкевич И.И., Яковенко Ю.С., Куликаускас В.С., Шепелевич В.Г., Ташлыков И.С.** Исследование микроструктуры, элементного состава и свойств приповерхностных слоев быстро-затвердевших сплавов алюминия с Cr, Zn и In. 104  
**Ташлыкова-Бушкевич И.И., Amati M., Sezen H., Шепелевич В.Г., Gregoratti L., Kiskinova M.** Исследование структуры и состава быстрозатвердевших сплавов Al-Cr методом сканирующей фотоэлектронной спектроскопии с использованием синхротронного излучения. (Объединённый доклад, 20 мин) 105
3. **Выходец В.Б., Куренных Т.Е., Обухов С.И., Уймин М.А., Ермаков А.Е.** Изотопные и ядерно-физические методы исследования дефицита кислорода в нанопорошках диоксида титана. 106  
**Выходец В.Б., Куренных Т.Е., Нефедова О.А., Обухов С.И.** Исследование температурной зависимости коэффициентов диффузии дейтерия в La<sub>0.9</sub>Sr<sub>0.1</sub>ScO<sub>3</sub> с помощью ядерного микроанализа в режиме «он-лайн». (Объединённый доклад, 20 мин) 107
4. **Белоглазова П.А., Березнеева Е.В., Пушилина Н.С., Ремнёв Г.Е., Чернов И.П.** Взаимодействие водорода с поверхностью Zr<sub>1</sub>%Nb и VT1-0, модифицированной импульсным ионным пучком (15 мин) 108

*16<sup>30</sup> – 17<sup>15</sup> - Обсуждение стендовых докладов.*

27 мая, среда, 17<sup>15</sup> – 18<sup>45</sup>II вечернее заседаниеПредседатель И.С. Ташлыков

1. **Углов В.В., Абади Г., Злоцкий С.В., Солодухин И.А., Шиманский В.И., Сувалов А.М.** Структурно-фазовые изменения в тонкопленочной системе Zr-Si-N, облученной ионами ксенона 109  
**Углов В.В., Квасов Н.Т., Дорожкин Н.Н., Сафронов И.В.** Микроструктура и механические свойства нанокompозита nc-TiN/a-SiNx. (Объединённый доклад, 20 мин) 110
2. **Karaseov P.A., Karabeshkin K.V., Titov A.I., Ullah M.W., Kuronen A., Djurabekova F. and Nordlund K.** Photoluminescence quenching and damage formation in GaN under ion-beam irradiation (15 мин). 111
3. **Привезенцев В.В., Куликаускас В.С., Затекин В.В., Горячев А.В., Батраков А.А.** Влияние отжига на свойства Si, имплантированного ионами 64Zn<sup>+</sup> при подогретой подложке (15 мин). 112
4. **Козловский В.В., Васильев А.Э., Емцев В.В., Лебедев А.А.** Нелинейные эффекты в компенсации проводимости полупроводников радиационными дефектами (15 мин). 113

Стендовые доклады

1. **Поплавский В.В., Дорошко А.В., Матыс В.Г.** Исследование состава и свойств защитных слоев, формируемых на сталях ионно-ассистируемым осаждением кадмия и цинка. 114
2. **Михалкович О.М., Бобрович О.Г., Ташлыков И.С., Куликаускас В.С.** Элементный послойный анализ и свойства поверхности структур Mo пленка /стеклянная подложка, формируемых при ассистировании собственными ионами. 115
3. **Ташлыков И.С., Тульев В.В.** Состав тонкопленочных структур металл/бериллий, приготовленных ионно-ассистируемым нанесением покрытий 116
4. **Дидык А.Ю., Ерискин А.А. Куликаускас В.С., Силин П.В., Никулин В.Я.** Распределение водорода и дейтерия в сборках из двух Zr, Ti и Ni фольг после воздействия импульсной дейтериевой высокотемпературной плазмы. 117

5. **Дидык А.Ю., Ерискин А.А. Куликаускас В.С., Силин П.В., Никулин В.Я.** Распределение водорода и дейтерия в сборке из двух W фольг после воздействия импульсной дейтериевой высокотемпературной плазмы. 118
6. **Углов В.В., Квасов Н.Т., Асташинский В.М., Кудактин Р.С., Кузьмицкий А.М., Скуратов В.А.** Влияние облучения ионами ксенона на параметры кремниевых фотовольтаических структур, сформированных с помощью компрессионных плазменных потоков. 119
7. **Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Соловьев И.В., Ахмелкин Д.М.** Контроль радиационных излучений сенсорами на основе МДП-структур. 120
8. **Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А.** Модификация МДП-структур электронным облучением и сильнополевой инжекцией электронов. 121
9. **Яшин А.С., Волков Н.В., Валиков Р.А.** Применение статистических методов для оценки состояния ионномодифицированной внешней поверхности трубчатых образцов из сплавов циркония. 122
10. **Окулич Е.В., Михайлов А.Н., Гусейнов Д.В., Шемухин А.А., Балакшин Ю.В., Тетельбаум Д.И.** Исследование влияния условий ионного облучения на процесс дефектообразования в кремнии методами ESR, RBS-C и PIXE. 123
11. **Вершинин Г.А., Геринг Г.И., Панова Т.В., Бухбиндер Г.Л.** Анализ распределения примесных атомов в бинарных системах после высокоскоростного затвердевания из расплава. 124
12. **Ковивчак В.С., Панова Т.В., Михайлов К.А.** Облучение алюминиевого сплава мощным ионным пучком при повышенных температурах. 125
13. **Заставной А.В., Король В.М.** Низкотемпературная диффузия имплантированного в кремний натрия. 126
14. **Гусева Д.Г., Дмитриевский А.А., Ефремова Н.Ю., Жигачев А.О.** Фазовые превращения кремния под индентором в условиях малодозового бета-облучения. 127
15. **Тимченко Н.А., Кузнецов С.И., Крысина О.В., Сыртанов М.С., Бондаренко С.В.** Локальная структура покрытий на основе нитрида титана. 128
16. **Ваганова Н.И., Израилева Л.К., Руманов Э.Н.** Особенности кинетики образования наноструктур при облучении в неоднородных полях. 129
17. **Рогожин А.Е., Руденко К.В., Мяконьких А.В., Черныш В.С., А.А. Шемухин, Балакшин Ю.В., Рудаков В.И.** Исследование состава тонких диэлектрических сло-

- ев с помощью ионно-пучковых технологий. 130
18. **Шемухин А.А., Балакшин Ю.В., Назаров А.В., Воробьева Е.А., Кожемяко А.В., Медведев В.А.** Влияние параметров ионной имплантации на разупорядочение границы раздела в пленках кремния на сапфире. 131
19. **Арустамов В.Н., Ашуров Х.Б., Худойкулов И.Х., Кахрамонов Б.Р.** Распределение легирующих элементов (С, Мп, Сг, Si) в приповерхностном слое стали, обработанной вакуумным дуговым разрядом. 132
20. **Арустамов В.Н., Ашуров Х.Б., Нагайбеков Р.Б., Кадыров Х.Х., Худайкулов И.Х.** К вопросу о бросках напряжения вакуумного дугового разряда. 133
21. **Арустамов В.Н., Ашуров Х.Б., Худойкулов И.Х., Кахрамонов Б.Р.** О влиянии электрического поля на формирование катодных пятен вакуумной дуги и их направленное перемещения. 134
22. **Арустамов В.Н., Ашуров Х.Б., Худойкулов И.Х., Кахрамонов Б.Р.** Вакуумно-дуговая обработка поверхности конструкционных материалов. 135
23. **Атабаев Б.Г., Шаропов У.Б., Джаббарганов Р., Курбанов М.К., Зияев Б.А.** Сравнительное исследование спектров полного тока поли и монокристаллов оксида цинка. 136
24. **Джемилев Н.Х., Коваленко С.Ф., Максимов С.Е., Тугушев В.И., Тукфатуллин О.Ф., Хожиев Ш.Т.** Эмиссия и фрагментация кластеров при бомбардировке поверхностей Nb, Ta и Ag ионами SF<sub>5</sub><sup>+</sup> и инертных газов. 137
25. **Джемилев Н.Х., Коваленко С.Ф., Максимов С.Е., Тукфатуллин О.Ф., Хожиев Ш.Т.** Исследование образования и мономолекулярной фрагментации кластеров Si<sub>n</sub>O<sub>m</sub><sup>+</sup> при ионной бомбардировке. 138
26. **Мухтаров З.Э., Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е., Кодиров Т., Исаханов У.З.** Изучение элементного и химического состав поверхности CdTe, имплантированного ионами активных металлов. 139
27. **Мухтаров З.Э., Халматов А.С., Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е., Рузйбаева М.К.** Влияние имплантации ионов на состав и структуру свободных пленок Cu и слоистых структур Si-Cu. 140
28. **Ниматов С.Ж., Руми Д.С.** Метод оценки степени структурного совершенства поверхности нанокристаллов. 141
29. **Нурсротов Р.А., Юлдашев Ш.У.** Наблюдение диффузии междузернового Zn из тонкой пленки ZnO в Si подложку. 142

30. **Оксенгендлер Б.Л., Джурабекова Ф.Г., Максимов С.Е., Тураев Н.Ю.** Синергетика катастрофических отказов полупроводниковых приборов при высоко энергетичном ионном облучении. 143
31. **Рысбаев А.С., Хужаниязов Ж.Б., Бекпулатов И.Р., Файзуллаев Р.Ф.** Термочувствительная структура, созданная имплантацией ионов P+ и B+ в Si(111). 144
32. **Рысбаев А.С., Хужаниязов Ж.Б., Бекпулатов И.Р., Хайридинов Б.Э.** Способ дополнительной очистки поверхности монокристаллов кремния. 145
33. **Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е., Донаев С.Б., Болтаев Х.Х.** Состав, структура и свойства границ раздела Al/Si, Al/NaSi<sub>2</sub>. 146
34. **Умирзаков Б.Е., Рузибаева М.К.** Влияние ионной бомбардировки на состав и структуру переходного слоя на границе нанопленочной системы TiN-Fe. 147
35. **Умирзаков Б.Е., Эргашов Ё.С., Ташатов А.К., Холмухамедова В.Х.** Ширина запрещенной зоны наноструктур Si, созданных на поверхности SiO<sub>2</sub> ионной бомбардировкой. 148
36. **Юсупджанова М.Б., Ташмухамедова Д.А., Раббимов Э., Миржалилова М.А.** Эмиссионные и оптические свойства тонких пленок SiO<sub>2</sub>/Si. 149
37. **Троицкий А.В., Михайлова Г.Н., Демихов Т.Е., Антонова Л.Х., Дидык А.Ю.** Радиационные эффекты в композитных ВТСП проводниках 150

**28 мая, четверг, 10<sup>00</sup> – 11<sup>30</sup>**I утреннее заседаниеПредседатель В.В.Привезенцев

1. **Егоров В.К., Егоров Е.В., Миронов Ю.М.** Ионопучковые и рентгеновские исследования псевдоэпитаксиальной структуры Au на мусковите (15 мин). 151
2. **Борисов А.М., Виноградов А.В., Савушкина С.В., Полянский М.Н., Ткаченко Н.В., Востриков В.Г.** Исследование структуры оксидных покрытий на цирконии и циркониевом сплаве Э110 (15 мин). 152
3. **Кабышев А.В., Конусов Ф.В.** Влияние ионного облучения и отжига на свойства оксида алюминия (15 мин). 153
4. **Григорьев П.Ю., Терентьев Д.А., Бакаев А.В., Журкин Е.Е.** Моделирование взаимодействия водорода с дефектами в вольфраме методом классической молекулярной динамики (15 мин). 154

11<sup>30</sup> – 12<sup>15</sup> – Обсуждение стендовых докладовСтендовые доклады

1. **Sajid Muhammad, Chechenin N.G., Frank Sill Torres, Khan E.U., Agha Shahrukh, Shahzeb Adeel** Radiation Effects Analysis of CMOS Devices in LEO Environment. 155
2. **Борисенко Л.А., Орехов А.С., Каменских А.И., Ткаченко Н.В., Востриков В.Г.** Исследования аэрогелей на основе SiO<sub>2</sub> с использованием спектрометрии ядерного обратного рассеяния протонов. 156
3. **Борисов А.М., Востриков В.Г., Каменских А.И., Куликаускас В.С., Ткаченко Н.В., Черник В.Н.** Исследование деградации полиимидных пленок в потоках кислородной плазмы методами РОР и ЯОР. 157
4. **Вирюс А.А., Коровушкин В.В., Степович М.А., Шипко М.Н., Филиппов М.Н.** Электроннозондовые исследования влияния магнито-импульсной обработки на структуру и свойства ферритов. 158

5. **Борисов А.М., Владимиров Б.В., Каменских А.И., Криг Б.Л., Эпельфельд А.В., Ткаченко Н.В., Востриков В.Г.** Применение спектрометрии обратного рассеяния при разработке модифицирования магниевых сплавов микродуговым оксидированием. 159
6. **Воронина Е.Н., Новиков Л.С., Черник В.Н., Воробьева Е.А., Макунин А.В.** Воздействие потока атомарного кислорода на массивы углеродных нанотрубок. 160
7. **Якуткина Т.В., Волков Н.В., Валиков Р.А., Яшин А.С., Сысоева Н.В., Олейников И.В.** Состояния оксидных пленок на металлической подложке, выявленные методом эмиссионной ик-спектроскопии. 161
8. **Elsehly E.M.I., Chechenin N.G., Bukunov K.A., Makunin A.V., Priselkova A.B., Vorobyeva E.A., Motaweh H.A., Shemukhin A.A.** RBS and EDS investigation of deposition content in CNT-based filters for liquid solutions. 162
9. **Mohamed S. Badawi, Mona M. Gouda, Ahmed M. El-Khatib, Mohamed A. Elzaher, Abouzeid A. Thabet, Ahmed A. Salim and Mahmoud I. Abbas.** Determination of the NaI (TI) detector efficiency using radioactive parallellepipiped sources. 163
10. **Sahar E. Abo-Neima, Karolin Abdel-Aziz Barakat, Hassan Tourk1 Marzoga F.Ragab and Hussein A. Motaweh.** Variation of hematological parameters in rats exposed to electromagnetic radiation. 164
11. **Букунов К.А., Шемухин А.А., Макунин А.В., Воробьева Е.А., Чеченин Н.Г.** Исследование состава ориентированных углеродных нанотрубок методом RBS и EDS 165
12. **Попов В.П., Антонов В.А., Сафронов Л.Н., Подлесный С.Н., Куприянов И.Н., Пальянов Ю.Н.** Формирование NV-центров в алмазе, имплантированном водородом, с объёмным и тонкослойным легированием азотом 166
13. **Ерискин А.А., Бондаренко Г.Г., Колокольцев В.Н., Куликаускас В.С., Силин П.В., Никулин В.Я.** Применение метода POP для определения профиля распределения и элементного состава пленок, напыленных на установке плазменный фокус. 167





**Секция I**

**ФИЗИКА ОРИЕНТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ**



## ВОЛНА МЕДЛЕННОГО ЯДЕРНОГО ГОРЕНИЯ В РЕАКТОРЕ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

С.П. Фомин<sup>1,2)</sup>, Ю.П. Мельник<sup>1)</sup>, В.В. Пилипенко<sup>1)</sup>, А.С. Фомин<sup>1)</sup>,  
Н.Ф. Шульга<sup>1,2)</sup>

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

<sup>2)</sup> ХНУ им. В.Н. КрАЗина, Харьков, Украина

Значительный интерес, в плане устойчивого развития энергетики, представляет разработка новых концепций ядерных реакторов с так называемой «внутренней безопасностью», в которых развитие неконтролируемой цепной реакции невозможно благодаря физическим принципам, заложенным в их конструкции. Одна из таких концепций предложена Л.П. Феоктистовым /1/. Она основана на использовании самоорганизующегося режима бегущей волны медленного ядерного горения в реакторе на быстрых нейтронах. Критическое состояние в таком реакторе поддерживается автоматически без внешнего управления. В качестве топлива в нем можно использовать природный или обедненный уран и торий, а также отработанное топливо других реакторов. Такой реактор может работать десятки лет без перегрузки и переработки топлива. Эти и другие удивительные особенности этой концепции в разные годы привлекали внимание таких ученых, как Э. Теллер /2/, А.И. Ахиезер /3/, Х. Секимото /4/ и других.

В настоящем докладе дан краткий обзор результатов проводимых в ННЦ ХФТИ работ по созданию физических основ быстрого реактора, работающего в режиме волны ядерного горения /5–7/.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Л.П. Феоктистов. ДАН СССР, 1989, 309, 864.
2. E. Teller. Preprint UCRL-JC-129547, 1997, 10 p.
3. A.I. Akhiezer, et al. Probl. At. Sci. Tech., 2001, 6, 272.
4. H. Sekimoto, et al. Nucl. Sci. Engin., 2001, 139, 306.
5. S.P. Fomin, et al. Annals Nucl. Energy, 2005, 32, 1435.
6. S.P. Fomin, et al. Progress Nucl. Energy, 2008, 50, 163.
7. S.P. Fomin, et al. Progress Nucl. Energy, 2011, 53, 800.

ЭФФЕКТ ОКорокова – КОгерентное возбуждение быстрых  
многoзарядных ионов в кристаллах:  
50 лет исследований

Ю.Л. Пивоваров  
Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет, Томск, Россия

Представлен обзор теоретических и экспериментальных работ по эффекту Окорoкова – когерентному возбуждению быстрых многoзарядных ионов в кристаллах, выполненных в течение 50 лет с момента предсказания эффекта /1-2/.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В.В. Окорoков. Ядерная физика, 2, 1965, С. 1009.
2. В.В.Окорoков. Письма в ЖЭТФ, 2, №12, 1965, С.111.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЧЕРЕЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТРУБКИ

В.П. Петухов<sup>1)</sup>, М.В. Петухов<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup>ИП, Москва, Россия

На базе экспериментальной вакуумной камеры UNIVEX – 350 разработана методика для исследования процессов прохождения электронов с энергиями до нескольких десятков кэВ через диэлектрические трубки. Работа является продолжением исследований трансмиссии электронов через капилляры /1/. Проведены измерения коэффициентов трансмиссии и измерены спектры рентгеновского излучения. Полученные результаты указывают на возможность поворота пучка электронов на большие углы без существенной потери интенсивности, что найдет широкое применение в технике и научных исследованиях.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В.П. Петухов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования 2010, № 3, с. 12.

## ИЗЛУЧЕНИЕ КАНАЛИРОВАННЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

О.В. Богданов<sup>1)</sup>, Ю.Л. Пивоваров<sup>1)</sup>, Е.И. Фикс<sup>1)</sup>

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

Основные особенности излучения Вавилова-Черенкова заряженных частиц, двигающихся в ондуляторе, рассмотрены в /1/. В /2-4/ исследовано излучение заряда, движущегося по периодической траектории, с учетом поглощения среды. Был выявлен ряд особенностей, тесно связанных с нормальным и аномальным эффектом Доплера. Нами были проведены детальные расчеты по исследованию излучения каналированных релятивистских ионов вблизи черенковского конуса для отдельных траекторий /5/.

Развитые методы /5/ применены для исследования оптического излучения каналированных релятивистских заряженных частиц в кристалле, для реальных параметров пучка. Проведен анализ спектрально-угловых характеристик излучения (с учетом усреднения по траекториям) при плоскостном каналировании ионов в кристалле С (алмаз).

### ЛИТЕРАТУРА

1. В.Л. Гинзбург. Теоретическая физика и астрофизика. Дополнительные главы. Изд.: Наука. 1987.
2. V.M. Grichine // Radiation Physics and Chemistry 67, 2003, С. 93.
3. V.G. Baryshevskii, I. YA. Dubovskaya // Dokl. Akad. Nauk SSSR 231, 1976, С. 1335.
4. S. Bellucci, V. A. Maisheev // J. Phys.: Condens. Matter 18, 2006, С. 2083.
5. E.I. Fiks, O. V. Bogdanov, Y. L. Pivovarov. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B (2015) in press.

## КВАЗИКЛАССИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭФФЕКТА БАРКАША

К.М. Ерохин<sup>1)</sup>, Н.П. Калашников<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> ФГБОУ «МГИУ», Москва

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

На основе квазиклассической модели торможения тяжелых заряженных частиц, в которой учитывается различие в орбитальном движении электронов атомов мишени, получена поправка к формуле Бора, позволяющая объяснить отличие в торможении положительно и отрицательно заряженных частиц (эффект Баркаша). Показано, что учет положения атомного электрона относительно пролетающей частицы приводит к увеличению вклада от адиабатического взаимодействия, при котором в большей части столкновений не происходит передачи энергии, что является причиной уменьшения энергетических потерь медленных частиц по сравнению с теорией Бора. Получено, что потери энергии на единице длины пути могут быть представлены в виде произведения двух функций – энергетических потерь в соответствии с теорией Бора и динамической функции, учитывающей поправки, связанные с изменением положения электрона в атоме мишени в процессе столкновения. Учет зависимости направления вектора электрического момента и деформации электронной орбиты в зависимости от знака заряда пролетающей частицей дает возможность качественно и количественно объяснить различия в энергетических потерях частиц и античастиц. Расчеты торможения антипротонов в водородной мишени показали удовлетворительное согласие с данными экспериментов.

## НЕУПРУГИЕ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕЗАРЯДКИ

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

Рассмотрены потери энергии ионов с зарядами ядер от 5 до 10 и энергией  $E$  в процессе перезарядки  $S_{q\pm 1}/I$  при прохождении ионов через вещество, 
$$S_{q\pm 1} = \rho \sum_q F_q \left[ \sigma_{q,q+1} (mV^2/2 + |\mathcal{E}_q|) + \sigma_{q,q-1} (mV^2/2 - |\mathcal{E}_{q-1}|) \right],$$
 где  $\rho$  - плотность материала мишени,  $q$  - заряд иона,  $F_q$  - равновесные зарядовые фракции,  $\sigma_{q,q\pm 1}$  - сечения потери и захвата одного электрона в столкновении иона и атома мишени с зарядом ядра  $Z_t$ ,  $m$ -масса электрона,  $V$  - скорость иона,  $\mathcal{E}_q, \mathcal{E}_{q-1}$  - энергия связи электрона в ионе с зарядом  $q$  и  $q-1$ , соответственно. Проведено сравнение  $S_{q\pm 1}$  с суммарными неупругими потерями энергии  $S_{el}$  /2/ (рис.1).

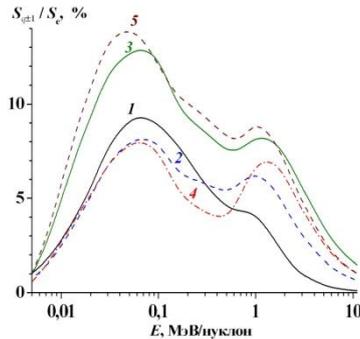


Рис.1 Отношение потерь энергии в процессах перезарядки ионов азота к сумме всех неупругих потерь энергии в зависимости от энергии  $E$ : 1 -  $Z_t=6$ ; 2 -  $Z_t=13$ ; 3 -  $Z_t=28$ ; 4 -  $Z_t=42$ ; 5 -  $Z_t=79$ .

Установлено, что вклад потерь энергии в процессе перезарядки ионов азота в сумму всех неупругих потерь энергии является значительным (до 15%).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Belkova Yu. A. et al. // Nucl.Instr.Meth. B. 2015. V.343. P.110.
2. Ziegler J.F. // SRIM ([www.srim.org](http://www.srim.org)).

## МОДЕЛЬ ЭФФЕКТА ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ

В.Л. Левшунова<sup>1)</sup>, Г.П. Похил<sup>2)</sup>, Д.И. Тетельбаум<sup>1)</sup><sup>1)</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия<sup>2)</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия

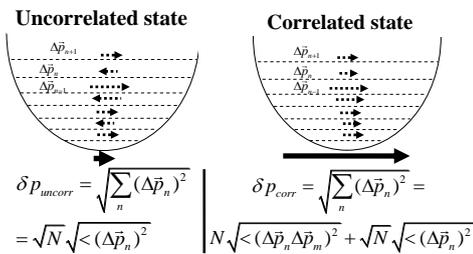
Эффект дальнего действия (ЭД) исследуется уже несколько десятков лет, и мы полагаем, что теперь можно считать, что многие его закономерности стали в основном понятными. С самого начала представление о передаче эффекта воздействия на переднюю (облучаемую) поверхность образца к задней поверхности связывалось с акустическими волнами. Экспериментально было показано, что важную роль в ЭД играет поверхностный окисный слой на облучаемой стороне образца. Окисный слой обладает пьезоэлектрическими свойствами. Перезарядка дефектов при внешнем воздействии приводит к генерации акустической (гиперзвуковой) волны. Но нужен еще механизм доставки возбуждения к задней стенке образца. Дислокационные трубки являются волноводами, которые доставляют гиперзвуковой импульс к задней поверхности образца практически без потери интенсивности. Акустическая волна вряд ли может создавать дефекты, ответственные за ЭД, но она может стимулировать перестройку уже имеющихся дефектов, например, вызывать эмиссию точечных дефектов из атмосфер Коттрелла в объем. Другая возможность связана с дислокационными петлями. Их переориентация может быть вызвана акустической волной. Таким образом, мы имеем единую картину механизма ЭД. Но явление ЭД чрезвычайно богато различными проявлениями, механизм которых еще предстоит понять.

# ЭФФЕКТ НАНОУСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦ В МЕЖАТОМНОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ И ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИЙ С ИХ УЧАСТИЕМ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОГЕРЕНТНОГО КОРРЕЛИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

В.И. Высоцкий, М.В.Высоцкий  
Киевский университет им.Т.Шевченко, Украина

Рассмотрены особенности спонтанного кратковременного наноускорения заряженных частиц в межатомной (внутрикристаллической) потенциальной яме при формировании когерентного коррелированного состояния (ККС) при слабом механическом или электромагнитном воздействии на кристалл. Процесс соответствует соотношениям неопределенностей Шредингера-Робертсона

$$\delta x \delta p \geq \hbar / 2\sqrt{1-r^2}, \quad \delta E \delta t \geq \hbar / 2\sqrt{1-r^2}.$$



Здесь  $|r| \leq 1$  - коэффициент корреляции. Формирование ККС связано с синхронизацией флуктуаций импульса разных собственных функций частицы, находящейся в суперпозиционном состоянии (см.Рис.), что ведет к формированию гигантских флуктуаций импульса частицы  $\delta p_{corr} \approx \hbar/a$  и

энергии  $\delta E_{corr} \geq 10...100 KeV$  /1-6/. Исследованы аномалии ядерных реакций с участием заряженных частиц, ускоренных флуктуациями  $\delta E_{corr}$ : запрет реакций с образованием составного долгоживущего (радиоактивного) ядра; торможение каналов, приводящих к вылету «медленных» барионов ( $p, n, \dots$ ); отсутствие тормозного излучения и др.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Высоцкий В.И., Адаменко С.В. ЖТФ, 80, №5, 23 (2010).
2. Высоцкий В.И.,Высоцкий М.В.,Адаменко С.В. ЖЭТФ,141,276 (2012).
3. Высоцкий В.И.,Адаменко С.В.,Высоцкий М.В. ЖЭТФ,142,627 (2012).
4. Vysotskii V.I., Vysotskyu M.V. European Phys. Jour. A49 (2013): 99.
5. Vysotskii V.I., Adamenko S.V., Vysotskyu M.V. Annals Nuclear Energy, 62, 618 (2013).
6. Высоцкий В.И., Высоцкий М.В. ЖЭТФ, 147, 173 (2015).

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ИОНИЗАЦИОННЫХ ПОТЕРЯХ  
ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЙ ПАРЫ НА БОЛЬШИХ РАССТОЯНИЯХ ОТ  
ТОЧКИ ЕЕ РОЖДЕНИЯ

С.В. Трофименко, Н.Ф. Шульга  
Институт теоретической физики им. А.И. Ахиезера ННЦ ХФТИ, г. Харьков,  
Украина  
Харьковский национальный университет  
им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина

В работе /1/ был предсказан (а впоследствии экспериментально наблюдался) эффект, состоящий в подавлении ионизационных потерь высокоэнергетической электрон-позитронной пары в веществе вблизи точки ее рождения по сравнению с потерями пары на большом расстоянии от этой точки. Согласно /1/, расстояния, в пределах которых такой эффект проявляется, линейно растут с ростом энергии пары и, в частности, для пары с энергией 100 ГэВ достигают нескольких сотен микрон. В настоящей работе рассмотрена ситуация, в которой такие расстояния пропорциональны квадрату энергии пары и при рассматриваемом значении энергии достигают 10 метров. Такая ситуация соответствует ионизационным потерям пары в вакууме на некотором расстоянии от вещества, в котором пара рождается. Показано, что в этом случае может быть необходимым учет непараллельности траекторий электрона и позитрона, которой ранее справедливо пренебрегали во всех теоретических исследованиях ионизационных потерь электрон-позитронных пар.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А.Е. Чудаков // Изв. АН СССР, серия физическая, 1955, т. 19, №6, с. 651.
2. S.V. Trofymenko, N.F. Shul'ga // Phys. Lett. A, 2013, v. 377, p. 2265.
3. N.F. Shul'ga, S.V. Trofymenko // Phys. Lett. A, 2014, v. 378, p. 315.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ БЕСКОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ СО СТРУКТУРИРОВАННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

К.А. Вохмянина<sup>1)</sup>, В.С. Левина<sup>1)</sup>, И.А. Кищин<sup>1)</sup>, А.С. Кубанкин<sup>1)</sup>, Р.М. Нажму-  
динов<sup>1)</sup>, А.Н. Олейник<sup>1)</sup>, А.В. Сотников<sup>1)</sup>,

Г.П. Похил<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup> НИИЯФ МГУ им. Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

Возможности излучения заряженных частиц, движущихся над структурированной поверхностью достаточно хорошо изучены теоретически и экспериментально [1-3]. Основной проблемой, ограничивающей возможность использования излучения, генерирующегося подобным образом, является сложность реализации режима, при котором все заряженные частицы движутся вблизи структурированной поверхности радиатора в одинаковых условиях. В данной связи актуальной задачей является сжатие пучка заряженных частиц, что позволит уменьшить разброс прицельных параметров взаимодействующих с радиатором частиц.

В настоящей работе приводятся результаты исследования возможности управления параметрами пучка заряженных частиц при его взаимодействии со структурированной поверхностью – дифракционной решёткой. Результаты исследования демонстрируют возможность уменьшения суммарного прицельного параметра электронов пучка, взаимодействующих с мишенью, что открывает возможность увеличить эффективность источников излучения, основанных на дифракционных механизмах излучения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. S.J. Smith and E. M. Purcell, Phys. Rev.1953, 92,1069
2. P.M. Van den Berg, J. Opt. Soc. Am. 1974,64, 325
3. A.Gover, P.Dvorkis, U.Elisha, J.Opt. Soc. Am. B,1984, 1, 723

## ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 10 КЭВ ЧЕРЕЗ СТЕКЛЯННЫЕ МАКРОКАПИЛЛЯРЫ КОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

К.А. Вохмянина<sup>1)</sup>, В.С. Левина<sup>1)</sup>, И.А. Кищин<sup>1)</sup>, А.С. Кубанкин<sup>1)</sup>, Р.М. Нажмудинов<sup>1)</sup>, А.Н. Олейник<sup>1)</sup>, А.В. Сотников<sup>1)</sup>, Г.П. Похил<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup> НИИЯФ МГУ им. Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

Исследование возможности формирования пучков заряженных частиц с помощью диэлектрических каналов представляет собой актуальную задачу в связи с потенциальными возможностями создания недорогого и компактного устройства управления ионами и электронами.

Выполнен ряд экспериментов по изучению прохождения электронов с энергией 10 кэВ через стеклянные макрокапилляры конической формы. Показано, что при определенных соотношениях входного и выходного диаметров канала плотность тока прошедшего пучка электронов может увеличиться на два порядка по сравнению с первоначальной. Измерение спектров прошедших через макрокапилляр электронов позволяет определить долю частиц, не испытавших потерь энергии при прохождении канала.

## ПРОЦЕССЫ ТОРМОЖЕНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОНА В ТЯЖЕЛОМ ВЫСОКОНАПОЛНЕННОМ ПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИТЕ

В.И. Павленко<sup>1)</sup>, О.Д. Едаменко<sup>1)</sup>, Н.И. Черкашина<sup>1)</sup>, А.В. Носков<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

<sup>2)</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

В последнее время активно ведутся разработки полимерных композиционных материалов на основе оксида висмута с целью снижения интенсивности электромагнитных помех от разрядных явлений в объеме элементов космического оборудования [1].

Ранее авторами разработана технология получения композита на основе фторопластовой матрицы и модифицированного оксида висмута с достижением более высокой степени наполнения при максимальном повышении прочностных характеристик композита по сравнению с известными аналогами [1].

В данной работе проведены математические расчеты процессов торможения низкоэнергетического электрона в тяжелом высоконаполненном композите оптимального состава. Дана оценка основных характеристик радиационной защиты при прохождении низкоэнергетического электрона в исследуемом материале.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки в сфере научной деятельности № 11.2034.2014/К.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Павленко В.И., Едаменко О.Д., Тарасов Д.Г. и др. Павленко В.И. Радиационно-защитный металлоолигомерный наполнитель для полимерных композитов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. - №2. – С. 117-120.

## СТРУКТУРА СОБСТВЕННЫХ ФУНКЦИЙ ЭЛЕКТРОНА В КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ АКСИАЛЬНОГО КАНАЛИРОВАНИЯ

Н.Ф. Шульга<sup>1)</sup>, В.В. Сыщенко<sup>2)</sup>, А.И. Тарновский<sup>2)</sup>,  
А.Ю. Исупов<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> ИТФ им. А.И. Ахиезера ННЦ ХФТИ, Харьков, Украина

<sup>2)</sup> НИУ «БелГУ», Белгород, Российская Федерация

<sup>3)</sup> ЛФВЭ ОИЯИ, Дубна, Российская Федерация

С использованием так называемого спектрального метода [1, 2] рассчитаны волновые функции состояний, соответствующих квантованным собственным значениям энергии поперечного движения электронов, движущихся в режиме аксиального каналирования в системе двух параллельных цепочек [110] кристалла кремния. Структура этих волновых функций позволяет увидеть проявления хаотического характера классической динамики в индивидуальных квантовых состояниях, а не только в статистических свойствах больших массивов уровней энергии, которые обычно исследуются в проблематике квантового хаоса [3].

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (проектная часть государственного задания № 3.500.2014/К в сфере научной деятельности).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Feit M.D., Fleck J.A., Jr., Steiger A. // Journal of Computational Physics, 1982, v. 47, p. 412-433.
2. Shul'ga N.F., Syshchenko V.V., Neryabova V.S. // NIM B, 2013, v. 309, p. 153-156.
3. N.F. Shul'ga, V.V. Syshchenko, V.S. Neryabova, A.Yu. Isupov // Journal of Physics: Conference Series, 2014, v. 517, p. 012030 (1-6).

## ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ СПИНА ЗАРЯЖЕННЫХ КВАЗИЧАСТИЦ В КРИСТАЛЛАХ

А.Я. Силенко<sup>1),2)</sup><sup>1)</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия<sup>2)</sup>НИУ Институт ядерных проблем, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Хорошо известно, что для электронов, позитронов и позитрония в кристаллах и других средах отношение эффективных масс к массам покоя  $m_{\text{eff}}/m$  может существенно отличаться от единицы /1-4/. При значительном увеличении энергии различие между  $m_{\text{eff}}$  и  $m$  существенно уменьшается. Тем не менее, движение заряженных частиц в среде отличается от их движения во внешних полях в вакууме. Для описания движения спина заряженных частиц при плоскостном каналировании в кристаллах мы используем одночастичное приближение, рассматривая частицу в среде как квазичастицу. Изменением магнитного момента частиц при взаимодействии со средой можно пренебречь. Однако его разбиение на дираковский и аномальный магнитные моменты меняется вследствие изменения частоты прецессии Томаса. Классический и квантово-механический подходы приводят к одинаковым результатам. Мы ожидаем, что различие в движении спина частиц в вакууме и квазичастиц в среде должно проявиться при плоскостном каналировании быстрых позитронов в изогнутых кристаллах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников С.Г. Электричество, 6-е изд., Москва, Физматлит, 2003, с. 427.
2. Погосов В.В. Введение в физику зарядовых и размерных эффектов. Поверхность, кластеры, низкоразмерные системы, Москва, Физматлит, 2006, с. 271.
3. Сабиров Р.Х. // ФТТ, 1995, т. 37, № 10, с. 2909.
4. Сабиров Р.Х. // ФТТ, 1996, т. 38, № 9, с. 2719.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТКЛОНЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗОГНУТЫМ КРИСТАЛЛОМ КРЕМНИЯ

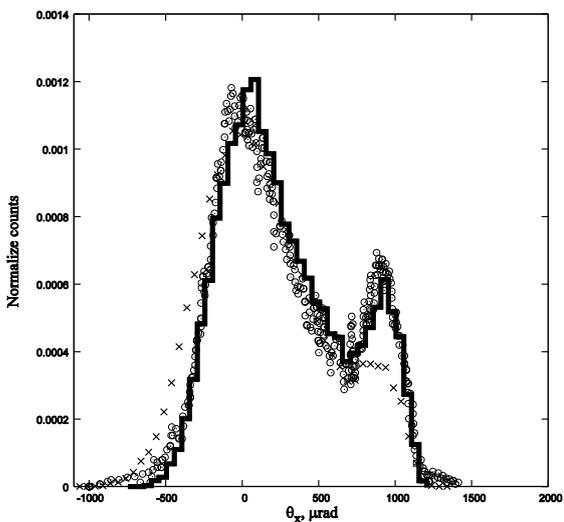
В.П. Кошечев<sup>1)</sup>, Ю.Н. Штанов<sup>2)</sup>, Д.А. Моргун<sup>3)</sup>, Г.А. Панина<sup>3)</sup>

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

<sup>2)</sup> Сургутский институт нефти и газа (филиал) ФГБОУ ВПО «ТюмГНГУ».

<sup>3)</sup> ГБОУ ВПО «Сургутский государственный университет ХМАО-Югры»

Отклонение релятивистских электронов изогнутым кристаллом кремния наблюдали в /1/. На рисунке представлено угловое распределение пучка электронов с энергией 855 МэВ, прошедших (111) плоскостной канал изогнутого кристалла кремния. Сплошная линия – расчет /2/ с использованием атомного коэффициента диффузии /3/; крестики – расчет /2/ с коэффициентом диффузии /4/, кружки – эксперимент /1/.



### ЛИТЕРАТУРА

1. Mazzolari A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 135503.
2. <http://www.info.jinr.ru/programs/jinr/lib/tropics/index.html>
3. Кошечев В.П. // Изв. Вузов. Физика. 1997. № 8. С. 32-37.
4. Kitagawa M., Ohtsuki Y.H. // Phys. Rev. B. 1973. V.8. N 7. P. 3117-3123.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКТРОВ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НА ВОЛЬФРАМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТОВ

М.А. Горошко, С.Е. Степанов  
КФ ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», Калуга, РФ

Для получения информации о тепловых колебаниях атомов в молекулах и кристаллах широко используются результаты нейтронной спектроскопии, которые содержат как систематические, так и случайные погрешности /1/. При обработке спектров рассеяния нейтронов одной из основных задач является определение области локализации пиков и положения их максимумов. Применяемые методы, как правило, требуют предварительной фильтрации спектральных данных. В первую очередь это относится к методам, основанным на использовании первой и второй производных сигнала /2/.

В качестве альтернативы вычислению, в том числе численному, производных сигнала предлагается использовать вейвлет-разложение спектральных данных с помощью лифтинг-схемы /3/. Схема формирования вейвлет-коэффициентов такова, что анализ их поведения относительно нуля позволяет рассчитать не только области локализации пиков, но и точки положения максимумов. При этом многомасштабность разложения снижает влияние зашумленности измерений на получаемые результаты.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Новик Ю. З., Озеров Р. П., Хеннинг К. Структурная нейтронография, М.: Атомиздат, 1979, Т.1, 439 с.
2. Нахмансон М.С., Фекличев В.Г. Диагностика состава материалов рентгендифракционными и спектральными методами. Л.: Машиностроение, 1990. 351 с.
3. W. Sweldens // Z. Angew. Math. Mech. 1996. № 76. P. 41-44.

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КРИСТАЛЛА НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЛИВНЯ

В.А. Басков

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Параметры электромагнитного ливня, развивающегося в 1 мм разориентированном или в ориентированном вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  кристалле вольфрама, зависят от температуры кристалла. Положение максимума и энерговыделение в максимуме развития ливня, выходящего из кристалла и развивающегося далее в спектрометре, имеют пропорциональные зависимости от температуры кристалла. Оценка температуры, при которой кристалл невозможно сорентировать, составила  $\sim 980\text{K}$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мухин К.Н., Экспериментальная ядерная физика (часть 1), “Энергоатомиздат”, г. Москва, 1983.
2. Ахизер А.И., Шульга Н.Ф. // ЖЭТФ, 1983, 85, С. 94.
3. Байер В.Н., Катков В.М., Страховенко В.М. // Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах, издательство “Наука” СО АН СССР, г. Новосибирск, 1989.

## ПРОБЕГИ ЛЕГКИХ ИОНОВ В ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ

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

Рассмотрены величины пробегов ионов  $R$  с зарядами ядер  $Z=3-6$  и энергией  $E=1-8$  Мэв ( $0.25-0.7$  Мэв/нуклон) в ядерной фотоэмульсии, использующейся в космических исследованиях. Экспериментальные данные относятся к пробегам ионов в фотоэмульсии НИКФИ-Я2 (близкой по параметрам к эмульсии ИЛЬФОРД). Проведен анализ зависимости пробега от заряда ядра, массы и энергии ионов и сравнение с пробегими ионов в газах (воздухе).

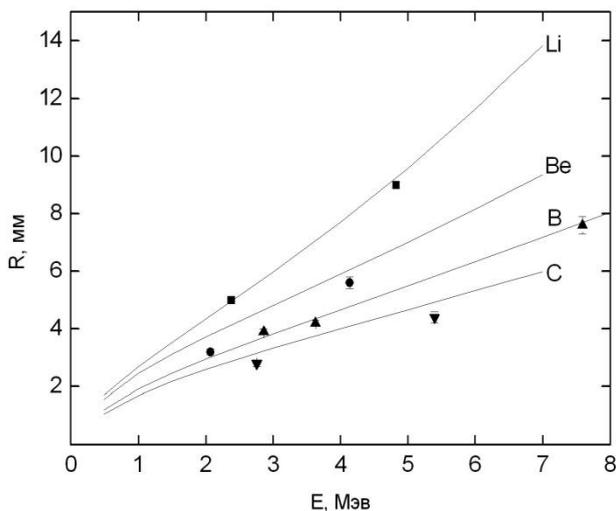


Рис. 1. Пробеги ионов Li, Be, B, C в ядерной фотоэмульсии в зависимости от энергии ионов. Значки – экспериментальные данные ■ – Li, ● – Be, ▲ – B, ▼ – C /1,2/, сплошные кривые – расчеты по программе SRIM-2013.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Теплова Я.А., Дмитриев И.С., Николаев В.С., Фатеева Л.Н. // ЖЭТФ, 1957, Т.32, вып.5, С.974.
2. Дмитриев И.С., Теплова Я.А.// Приборы и техника эксперимента, 1967, №4, С.62.

## НЕЛИНЕЙНОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ ФОТОНОВ (РАМАНОВСКОГО ТИПА) КАНАЛИРОВАННОЙ ЧАСТИЦЕЙ

Н.П. Калашников

Национальный исследовательский ядерный университет НИЯУ МИФИ, Москва,  
Россия

Каналированные частицы характеризуются дискретным спектром связанного поперечного движения. Взаимодействие фотонов с каналированными частицами в монокристаллах может сопровождаться энергетическими переходами между уровнями поперечного движения каналированной частицы. Комбинационное (Рамановское) рассеяние фотона на квази-связанной каналированной частице приводит к появлению комбинации частот: частоты падающего излучения  $\omega_0$  и частоты  $\Delta \omega_{m,n}$ , т.е.

$$\omega = \omega_0 \pm \Delta \omega_{m,n},$$

где  $\Delta \omega_{m,n} = 2\Delta\varepsilon_{m,n}\gamma^2$ ;  $\Delta\varepsilon_{m,n}$  есть энергия перехода между квантовыми состояниями “ $m$ ” и “ $n$ ” поперечного движения каналированной частицы;  $\gamma = \frac{E}{mc^2}$  есть Лорентц-фактор каналированной частицы  $/1/$ . Проводится анализ появления фиолетового спутника (анти-Стоксовой компоненты) в спектре рамановского комбинационного рассеяния. Рассматривается трехфотонный переход рамановского типа, представляющий процесс одновременного поглощения двух фотонов частоты  $\omega_0$  с испусканием фотона с частотой  $\omega_s = 2\omega_0 \pm 2\Delta\varepsilon_{m,n}\gamma^2$ . Обсуждаются условия наблюдения резонанса при образовании второй гармоники ( $\omega = 2\omega_0$ ).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Kalashnikov N.P., Krokhin O.N. Quantum Electronics. 2014. v.44 (№12). p.p.1109 – 1111. Raman scattering of a photon with frequency doubling by a channelled positron.

## ВЛИЯНИЕ ЗАХВАТА И ПОТЕРИ ДВУХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЗАРЯДОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ

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

Для ионов от бора до неона проведена оценка сечений потери и захвата двух электронов, основанная на экспериментальных данных об отношении  $\sigma_{q,q\pm 2}/\sigma_{q,q\pm 1}$  для ионов азота в газах [1], где  $\sigma_{q,k}$  - сечения перезарядки,  $q$  и  $k$  - заряд иона до и после столкновения, соответственно.

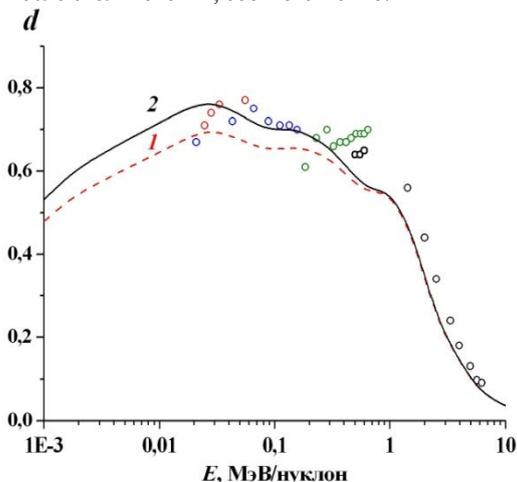


Рис.1 Зависимость ширины зарядового распределения  $d$  ионов бора в углероде от энергии ионов  $E$ : 1 – без учета  $\sigma_{q,q\pm 2}$ ; 2 – с учетом  $\sigma_{q,q\pm 2}$ ; (о) – экспериментальные данные [2].

Установлено, что учет процессов захвата и потери двух электронов увеличивает ширину зарядового распределения  $d$  на 10% в области энергии  $E < 0.1$  МэВ/нуклон, улучшая согласие результатов расчета с экспериментальными данными (рис. 1).

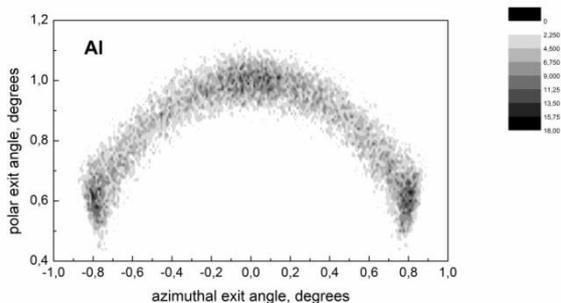
### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Dmitriev I.S. et al. // At. Data Nucl. Data Tables 2010. V.96. P.85.
2. Novikov N.V., Teplova Ya.A. <http://cdfc.sinp.msu.ru/services/cccs/cccs.htm>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ ПОВЕРХНОСТЬЮ КРИСТАЛЛА ПРИ СКОЛЬЗЯЩИХ ПАДЕНИЯХ

Л.А. Авакян, Т.И. Жилина, В.С. Малышевский, Г.В. Фомин  
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Методом математического моделирования исследованы особенности угловых распределений ускоренных нейтральных атомов при скользящих углах падения на поверхность Al (001). Взаимодействие ускоренных атомов с атомами кристаллической решетки, электронные свойства и атомная структура поверхности Al (001) рассчитывалась с использованием методов функционала электронной плотности.



Моделирование угловых распределений рассеянных атомов осуществлялось с учетом взаимодействия атомов с несколькими слоями атомов в кристаллической решетке и смещением атомов в процессе тепловых колебаний. Установлено влияние на радужное рассеяние релаксации поверхностных слоев кристалла, т.е. отличие расстояния между плоскостями на поверхности и в объеме. Обсуждаются возможности использования эффекта радужного рассеяния для изучения особенностей строения поверхности кристалла.

## О ВЛИЯНИИ ПРОЦЕССА ПОЛЕВОЙ ИОНИЗАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ

Г.Н. Дудкин<sup>1</sup>), С.И. Кузнецов<sup>1</sup>), М.И. Ломаев<sup>2</sup>),  
Б.А. Нечаев<sup>1</sup>), В.Н. Падалко<sup>1</sup>), Д.А. Сорокин<sup>2</sup>),  
В.Ф. Тарасенко<sup>2</sup>), Е.Н. Шувалов<sup>1</sup>), С. В. Бондаренко<sup>1</sup>)

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

<sup>2</sup>) Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Приведены результаты экспериментов по генерации нейтронов при наносекундном разряде в среде дейтерия с применением двух типов потенциальных электродов (анодов). Один из электродов изготовлен из стальной фольги, другой – набран из вольфрамовых проволочек с расщепленными концами. В качестве заземленного плоского катода в обоих случаях использовалась пластина из циркония, насыщенная дейтерием /1/.

Показано, что при использовании вольфрамового анода с развитой поверхностью ионы дейтерия, генерируемые в результате процесса полевой ионизации, составляют определяющую часть ионов вовлеченных в ускорение. Выход нейтронов в результате реакции  ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$  в этом случае примерно в 4 раза больше, чем для анода, изготовленного из стальной фольги. При этом максимальный выход нейтронов составил величину  $1.2 \cdot 10^4$  нейтронов/выстрел, временной интервал эмиссии нейтронов из катода  $\approx 1.5$  нс.

Использование возможностей полевой эмиссии ионов весьма перспективно для создания ионного источника с уникальной светимостью, поскольку в этом случае центрами полевой эмиссии ионов являются отдельные атомы, расположенные на неоднородной поверхности анода с пространственным масштабом меньше 1 мкм.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

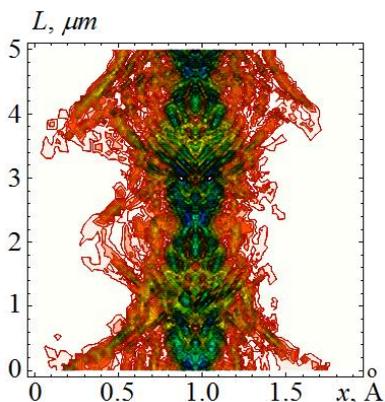
1. Ломаев М.И., Дудкин Г.Н., Нечаев Б.А. и др. // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – Вып. 14. – С. 1-8.

## ДИНАМИКА ВОЛНОВОГО ПАКЕТА ПРОТОНА ПРИ ПЛОСКОСТНОМ КАНАЛИРОВАНИИ В КРИСТАЛЛЕ Si

К.Б. Коротченко, Ю.Л. Пивоваров, Ю.Л. Эйхорн  
Томский политехнический университет, Томск, Россия

Изучение динамики потока заряженных каналированных частиц в кристаллах обычно проводится классическими методами на основе уравнения Фоккера-Планка. В работе представлена модель динамики потока протонов при плоскостном каналировании в рамках квантовой теории – рассчитана динамика волнового пакета. Расчеты проводились для кристалла кремния при (220) каналировании с использованием символьно-численного пакета Mathematica© и пакета подпрограмм, разработанных авторами [1].

На рис.1 приведен пример расчета для протонов с релятивистским фактором  $\gamma = 2$ .



Результаты расчетов могут быть полезны, например, при выборе толщины кристалла, позволяющей получить необходимую геометрию пучка.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bogdanov, O.V., Fiks, E.I., Korotchenko, K.B., Pivovarov, Yu.L., Tukhfatullin, T.A., // Journal of Physics: Conference Series, 236, 012029

## СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ НА ЭЛЕКТРОННУЮ СТРУКТУРУ ЦИРКОНИЯ

Л.А. Святкин, О.В. Лопатина, Ю.М. Коротеев, И.П. Чернов  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

Выполнены *ab initio* расчеты электронной структуры системы Zr–He–H и чистого циркония, сплавы на основе которого широко используются в качестве конструкционных материалов ядерных реакторов. Нароботка этих примесей происходит в результате (n, p), (n,  $\alpha$ ) ядерных реакций при бомбардировке металлов нейтронами. Накопление данных примесей в объеме материалов приводит к водородному и гелиевому охрупчиванию, газовому распуханию и, как следствие, ухудшению эксплуатационных свойств изделий. Для прогнозирования механических свойств изделий необходимо понимание влияния данных примесей на свойства циркония на атомарном уровне.

Анализ полученных результатов показал, что He и H по разному изменяют электронную структуру циркония. Так, 1s-состояния гелия формируют в Zr узкую зону, лежащую примерно на 12 эВ ниже дна зоны проводимости металла. Водород же, растворяясь в цирконии, отщепляет от дна зоны проводимости металла зону гибридных  $s^H-(s,p,d)^{Zr}$  состояний, образуя химическую связь. Присутствие водорода в системе Zr–He–H не оказывает заметного влияния на взаимодействие гелия с металлом, тогда как внедрение гелия приводит к уменьшению энергии связи Zr–H. Размещаясь в соседних междоузлиях решетки циркония, атомы водорода и гелия образуют химические связи не только с атомами металла, но и между собой. Внедрение He в систему Zr–H приводит к дополнительному переносу электронного заряда в МТ сферу водорода, а растворение H в системе Zr–He практически не изменяет зарядового состояния гелия.

ДИНАМИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ВАЛЕНТНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ В PdH<sub>x</sub> ПРИ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИИ.П. Чернов<sup>1)</sup>, В.М. Силкин<sup>2,3)</sup><sup>1)</sup> Томский политехнически университет, Томск, Россия<sup>2)</sup> Donostia International Physics Center and University of the Basque Country, San Sebastián, Spain<sup>3)</sup> Basque Foundation for Science IKERBASQUE, Bilbao, Spain

В настоящей работе теоретически исследовано пространственное распределение внутри кристалла PdH<sub>x</sub> динамических колебаний электронной плотности при воздействии внешнего возмущения. Расчеты были выполнены с полным включением электронной зонной структуры валентных электронов, полученной в рамках самосогласованного метода псевдопотенциала. Изучены свойства низкоэнергетического акустического плазмона в зависимости от концентрации водорода, его существование в чистом палладии было предсказанного в работе /1/. Возбуждение данного плазмона наблюдается в PdH<sub>x</sub> до концентрации, соответствующей полному заполнению 4d состояний палладия /2/.

Полученные результаты позволяют понять и объяснить эффекты, наблюдаемые при взаимодействии излучения с твердым телом. В том числе радиационно-ускоренную диффузию водорода, ядерные процессы, стимулированные низкоэнергетическими электронами, «эффект малых доз», «эффект дальнего действия».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Silkin V.M., Chernov I.P., Koroteev Y.M., Chulkov E.V., // Physical Review B, 2009, 80, 245114.
2. Silkin V.M., Nazarov V.U., Chernov I.P., Sklyadneva I.Y., Y.M., Chulkov E.V., // J. Phys.: Condens. Matter, 2015, 27, 055501.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КАНАЛИРОВАНИЯ АТОМНЫХ ЧАСТИЦ В ЖГУТАХ НАНОТРУБОК МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.А. Александров<sup>1)</sup>, А.С. Сабиров<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Чувашский государственный университет имени И.Н.Ульянова, Чебоксары, РФ

Подавляющее большинство работ в области взаимодействия атомных пучков с УНТ посвящено процессам каналирования в одиночных нанотрубках. Однако представляет не меньший интерес физика взаимодействия пучков частиц со жгутами - совокупностями нанотрубок, удерживаемых друг около друга Ван-дер-Ваальсовым взаимодействием и выстроенных в одном направлении с некоторым разупорядочением. В работе продолжено исследование влияния дефектов структуры одиночных УНТ /1/ на каналирование пучков атомных и молекулярных частиц (молекул водорода и молекулярных ионов водорода) в жгутах. Рассматриваются такие дефекты структуры, как вакансии атомов углерода на стенке УНТ, инородные атомы, адсорбированные на стенку УНТ, а также разупорядочение нанотрубок в жгуте. Используется метод молекулярной динамики для компьютерного моделирования движения частиц в жгуте. Можно ожидать, что характеристики каналирующих частиц будут чувствительны к нарушениям структуры УНТ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Александров, А.С. Сабиров// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015, №4, с. 53-56.

РОЛЬ ВАКАНСИЙ И АДСОРБИРОВАННЫХ АТОМОВ ПРИ  
КАНАЛИРОВАНИИ  
МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЧАСТИЦ В УНТ

В.А. Александров<sup>1)</sup>, А.С. Сабиров<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Чувашский государственный университет имени И.Н.Ульянова, Чебоксары,  
РФ

В работе продолжено исследование процессов взаимодействия пучков атомных частиц с нанотрубками с учетом квантово-механических эффектов /1/. Новым является использование пучков молекулярных частиц (молекул водорода и молекулярных ионов водорода) для диагностики нарушений структуры углеродных нанотрубок. К ним относятся вакансии атомов углерода на стенке УНТ, в частности, отсутствие двух соседних атомов, а также присутствие инородных атомов, адсорбированных изнутри на стенку УНТ. Используется метод молекулярной динамики для компьютерного моделирования движения молекулярных частиц в УНТ. Изучаются характеристики каналирования, степень возбуждения колебательных и вращательных степеней свободы молекулы. Можно ожидать, что данные характеристики каналирующих частиц будут более чувствительны к нарушениям структуры УНТ. Исследуются различные режимы облучения нанотрубок, применимых для их зондирования и модификации.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В.А. Александров, А.С. Сабиров// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015, №4, с. 53-56.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ЦЕПОЧКОЙ АТОМОВ УГЛЕРОДА

А.В. Иванов

Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева,  
Чебоксары, Россия

В работе изучается рассеяние протонов на цепочке атомов углерода. Модель представляет собой цепочку из 10 атомов углерода на расстоянии 0.154 нм и пучок протонов, с возможностью изменения прицельного параметра и начальной энергии. Получено дифференциальное сечение рассеяния пучка протонов. При помощи квазиклассического приближения исследуется амплитуда и фаза частиц после рассеяния.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛИРОВАНИЯ АТОМАРНОГО ПУЧКА В НАНОТРУБКАХ

Лысова И.В.<sup>1)</sup>, Михайлов А.Н.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева, Чебоксары, Россия

Большой интерес представляет изучение диапазона энергий, по которому распределяются частицы в нанотрубке. Эти данные предоставляют возможность применения нанотрубок для управления пучками частиц, с задачей внедрения в них атомов или ионов с целью получения материалов с новым свойствами. В нашей работе мы рассмотрели энергетические характеристики однородного потока частиц, каналирующего внутри нанотрубок различного типа. Исследован процесс каналирования потоков частиц в ОУНТ трех типов, а также рассмотрено каналирование в бор нитридной нанотрубке. Определены потери энергии атомов при каналировании в трубках с различной геометрией. Построены гистограммы распределения атомов по скоростям во всех рассматриваемых случаях. В данной работе проведены расчёты по каналированию атомарного потока частиц из атомов водорода и кислорода. В ходе компьютерного эксперимента был обнаружен эффект возникающей деформации трубки после продолжительного каналирования потока атомов. Все расчеты проведены методом молекулярной динамики в пакете LAMMPS /1/ с использованием многочастичного потенциала ReaxFF /2,3/.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Plimpton S. J. // J. Comput. Phys. 1995. 1. P. 117
2. Strachan A., Kober E. M., van Duin A. C. T. // J. Chem. Phys. 2005. 122. P. 54502.
3. Chenoweth K., van Duin A. C. T. and Goddard W. A., // J. Phys. Chem. A. 2008. 112. 1040.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИ САМОСБОРКЕ ЛЦУ МЕТОДОМ  
МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ  
В СИЛОВОМ ПОЛЕ «ReaxFF»

Ф.Н. Михайлов

Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева,  
Чебоксары, Россия

Продолжено исследование процесса выращивания линейно-цепочечного углерода на подложке из газопаровой фазы атомов углерода методом молекулярной динамики, начатое в /1/. Осуществлен переход к потенциалу «ReaxFF» /2, 3/, который обеспечивает точный счёт химического и механического поведения углеводородов, графита, алмаза, и других углеродных наноструктур /4-6/, в то же время потенциал способен обрабатывать тысячи атомов с квантово-химической точностью на длительном временном масштабе до нескольких наносекунд. Производится оптимизация параметров процесса выращивания ЛЦУ на подложке, таких, как концентрация атомов углерода, наличие бомбардировки сторонними атомами, выбор профиля температуры по координатам и времени для обеспечения наилучших условий выращивания и заданного качества цепочек ЛЦУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.А., Михайлов Ф.Н.// Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед., 2014, №4, С. 64.
2. Strachan A., Kober E. M., van Duin A. C. T. // J. Chem. Phys. 2005. 122. P. 54502.
3. Chenoweth K., van Duin A. C. T. and Goddard W. A, // J. Phys. Chem. A. 2008. 112. 1040.
4. van Duin A. C. T., Dasgupta S., Lorant F. // J. Phys. Chem. A. 2001. 105 9396.
5. Nielson K. D., van Duin A. C. T., Ongaard J. // Phys. Chem. A. 2005. 109. 493.
6. Chen N., Lusk M. T., van Duin A. C. T. // Phys. Rev. B. 2005. 72. 085416.

## ВЛИЯНИЕ УПРУГИХ ВОЗМУЩЕНИЙ СТЕНКИ УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКИ С УЧЕТОМ ВОЗМУЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДСИСТЕМЫ НА КАНАЛИРОВАНИЕ В НЕЙ МЕДЛЕННЫХ АТОМНЫХ ЧАСТИЦ

А. В. Степанов

Чебоксарский политехнический институт, г. Чебоксары, Россия

Каналирование медленных частиц в УНТ может быть использовано в процессах физико-химического осаждения или распыления, в процессе синтеза или модификации тонкопленочных материалов, для управления пучками атомных частиц.

Каналированию медленных атомных частиц в углеродных нанотрубках могут сопутствовать упругие возмущения стенки УНТ /1, 2/. Нами проведено молекулярно-динамическое моделирование каналирования ионов  $Ag^+$  с энергией 100 эВ в углеродных нанотрубках (10,10), (11,9) и (17,0). Частицы влетали в УНТ под углами 10-30° к ее оси. С целью учета азимутального разброса было проведено сканирование по азимутальному углу и по положению вдоль оси нанотрубки. Учитывалось наличие торможения каналируемой частицы на электронном газе. При движении частиц под большими углами к оси УНТ становилось возможным совпадение скорости движения каналируемой частицы и волны упругой деформации, и, следовательно, их взаимодействие. В зависимости от того в какой фазе движения частицы происходило это взаимодействие, наблюдалось уменьшение потерь энергии каналируемого иона.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Mišković Z.L. // Radiation Effects and Defects in Solids, 2007, 162, № 3-4, P. 185.
2. Степанов А.В. // В сб. Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами : тез. докл. 44-й Междунар. Конф., № 44, М, Изд-во МГУ, 2014, С. 64.

## ПОЛЯРИЗАЦИЯ УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКИ ДВИЖУЩИМСЯ ЗАРЯДОМ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА КАНАЛИРОВАНИЕ

Г.М. Филиппов<sup>1)</sup>, А.С. Сабиров<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> ЧПИ(Ф) МГМУ, Чебоксары, РФ

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

Классическая теория каналирования заряженных частиц в трубках малого диаметра (капилляры, поры в твердотельных пленках, УНТ) требует корректного учета возникающих при этом поляризационных полей. Среди множества работ, посвященных данной тематике, как правило, отсутствует корректный учет пространственной дисперсии среды. В данной работе предлагается подход, позволяющий оценить роль пространственной дисперсии в рассматриваемых явлениях. В частности, он позволяет учесть тот факт, что при уменьшении длины волны диэлектрические свойства среды достаточно быстро стремятся к вакуумным значениям. Как показывают аналогичные расчеты, произведенные для однородных слоев вещества с плоской геометрией, пространственная дисперсия приводит к существенной корректировке возникающих поляризационных полей. Выполнить то же самое для слоев с цилиндрической симметрией значительно сложнее и это, видимо, та причина, по которой работы такого рода нами не обнаружены в литературе.

## РАССЕЯНИЕ АТОМОВ ВОДОРОДА НА ГРАФЕНЕ

А.А. Джурахалов<sup>1)</sup>, В.Г. Стельмах<sup>2)</sup>, И.Д. Ядгаров<sup>2)</sup><sup>1)</sup>University of Antwerp, Antwerp, Belgium<sup>2)</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан

Графен представляет собой двумерную гексагональную углеродную кристаллическую решётку. Компьютерным моделированием с использованием молекулярной динамики изучались процессы столкновения атомов водорода с кинетическими энергиями 5 и 10 эВ со свободным графеном при разных углах падения, причем направления проекций на плоскость графена скоростей падающих атомов углерода выбиралось либо вдоль «zigzag»-направления либо вдоль «armchair»-направления графена. Для описания межатомного взаимодействия использовался потенциал Бреннера второго поколения [1], который хорошо описывает углеродные и водород-углеродные структуры.

Приведены результаты моделирования в виде гистограмм угловых и энергетических распределений рассеянных атомов водорода. Работа выполнена в рамках проекта ПФИ № Ф2-ФА-0-45116 республики Узбекистан.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. D.W. Brenner, O.A. Shenderova, J.A. Harrison, S.J. Stuart, B. Ni, S.B. Sinnott, //J. Phys: Condens. Matter, 2002, 14, 783.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПИРАЛЬНОГО КАНАЛИРОВАНИЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ

Н.В. Максютя, В.И. Высоцкий, С.В. Ефименко

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

В работе [1] проводился расчет потенциалов взаимодействия  $w(\rho)$  атомов водорода с углеродными нанотрубками (УНТ) с использованием одночастичных потенциалов Леннарда-Джонса. В данной работе проводятся аналогичные вычисления для других типов нейтральных частиц. Исследуется режим спирального каналирования этих частиц вдоль УНТ: 1) уравнение Шредингера

$$\left[ \Delta_{\rho\varphi} - 2\mu\gamma \left[ w(\rho) - \varepsilon_{n_p l} \right] / \hbar^2 \right] \Phi_{n_p l}(\rho, \varphi) = 0 \quad \text{заменой}$$

$\Phi_{n_p l}(\rho, \varphi) = \exp(\pm i l \varphi) \rho^l \chi_{n_p l}(\rho) / \sqrt{2\pi}$  ( $l = 0, 1, \dots$ ) сводится для волно-

вой функции  $\chi_{n_p l}(\rho)$  к задаче Штурма – Лиувилля, которая решается с помо-

щью программы, находящейся в библиотеке ИМСЛ фортрана 90; 2) находятся

вероятности заселения  $P_{n_p l}(\theta)$  энергетических уровней  $\varepsilon_{n_p l}$  поперечного

движения, а затем выполняются их усреднения с помощью нормального рас-

пределения при различных угловых дисперсиях  $\theta_0$ ; 3) строятся функции про-

филей  $\Pi_{n_p l}(\rho, \theta_0) = (2\pi)^{-1} \sum_{n_p, l} \rho^{2l} \chi_{n_p l} \langle P_{n_p l}(\theta) \rangle_{\theta_0}$ , по которым можно

косвенно судить о динамических процессах распространения нейтральных частиц вдоль длинных УНТ, а также об угловых распределениях нейтральных частиц после прохождения коротких УНТ.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Максютя Н.В., Высоцкий В.И., Ефименко С.В. // Тез. докл. XLIV межд. конф. по физике взаимодей. заряж. частиц с кристаллами // М.: Изд-во МГУ, 2014, С. 17.

О ВЕРОЯТНОСТИ ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ С БЛИЗКИМИ  
СТОЛКНОВЕНИЯМИ, ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ИЗОГНУТЫМ КРИСТАЛЛОМ

И.В. Кириллин<sup>1)</sup>, Н.Ф. Шульга<sup>1),2)</sup>

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

<sup>2)</sup> ХНУ им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина

На основе численного моделирования рассеяния высокоэнергетических заряженных частиц в кристалле проводится анализ вероятности процессов, связанных с близкими столкновениями заряженных частиц с цепочками атомов при отклонении заряженных частиц изогнутым кристаллом, для начальных условий, соответствующих соответствующим основным механизмам отклонения заряженных частиц изогнутым кристаллом.

В случае положительно заряженных частиц результаты моделирования движения частиц в изогнутом кристалле, опубликованные в [1], показывают высокую эффективность отклонения частиц при использовании стохастического механизма отклонения и плоскостного каналирования. Однако, вероятность близких столкновений при плоскостном каналировании в изогнутом кристалле значительно выше, чем при стохастическом отклонении. В случае отрицательно заряженных частиц указанная вероятность при стохастическом отклонении примерно в два раза превышает вероятность близких столкновений при начальных условиях, соответствующих плоскостному каналированию.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Yu.A. Chesnokov, I.V. Kirillin, W. Scandale, N.F. Shul'ga, V.I. Truten' // Phys. Lett. B, 2014, v. 731, p. 118.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАСПОРТИРОВКИ ИОННЫХ ПУЧКОВ ГЕЛИЯ В  
НАНОПОРИСТЫХ МАТРИЦАХА.А. Шемухин<sup>1)</sup>, А.В. Макунин<sup>1)</sup>, Р.Ш. Самигуллин<sup>2)</sup>,  
Е.Н. Муратова<sup>2)</sup><sup>1)</sup> НИИЯФ МГУ, Москва, Россия<sup>2)</sup> СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

В силу таких особенностей, как технологичность, невысокие время и ресурсозатратность, возможность получать различные в широком диапазоне по геометрическим параметрам пористые слои, пористый оксид алюминия находит все большую популярность среди исследователей в различных областях науки. В данной работе исследовались процессы прохождения ионных пучков гелия высоких (1,5-2 МэВ) энергий через капилляры пористой мембраны из оксида алюминия. Для этих целей были выбраны мембраны с малыми (20 нм) и большими (200 нм) порами. Толщина фольги (10 мкм) была выбрана так, чтобы длина свободного пробега анализирующих частиц была меньше. При снятии РОР спектров для мембраны на ускорительном комплексе AN-2500 детектируемый угол рассеяния составлял  $165^\circ$ , в то время как для изучения прошедшего сквозь мембрану пучка детектируемый угол составлял  $105^\circ$ . В качестве «регистрирующей» среды – мишени за мембраной на расстоянии 30 мм располагался образец, содержащий более «тяжелый» элемент, в частности, гафний (*Hf*) –  $HfO_2$  (24nm)/*Si* (100). Результаты показали, что пучок, проходит через мембрану практически без потерь энергии. Даже незначительное отклонение мембраны от нормали (1,5...3 градуса) по отношению к направлению распространения ионного пучка приводит к уменьшению выхода обратнорассеянных ионов с  $HfO_2$  мишени и, следовательно, к уменьшению фиксируемого тока. Максимальный измеренный коэффициент пропускания соответствует 0,625.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК 14-08-31609\14 от 10.02.2014 мол\_а.

## ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЖИВУЮ КЛЕТКУ УДАРНОЙ ВОЛНЫ, РОЖДАЕМОЙ БЫСТРОЙ ЧАСТИЦЕЙ

Г.П. Похил<sup>1)</sup>, В.С. Куликаускас<sup>1)</sup>, А.В. Журухина<sup>1)</sup>, К.А. Труханов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени

Д.В. Скобелъцына, МГУ имени М.В. Ломоносова,

<sup>2)</sup> ГНЦ РФ-ИМБП РАН

Одним из важных применений конического капилляра представляется возможность исследования биологических эффектов акустических ударных волн, возникающих при прохождении заряженных частиц с высокой величиной линейной передачи энергии (ЛПЭ) через биологические среды. Эффект возникновения ударных волн был предсказан Г.А. Аскарьяном [1]. По оценкам давление ударной волны может быть достаточно большим на расстояниях, существенно превышающих область ионизации в треках частиц с высокими величинами ЛПЭ. Представляется важным как с научно-фундаментальной точки зрения, так и исходя из проблем пилотируемой космонавтики, изучить это явление. В НИИЯФ на ускорителе АН-2500 создана установка с микропучком, на которой проводятся исследования «дистантного» воздействия ионизирующего излучения на живую клетку. Получены первые результаты этих экспериментов.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Аскарьян Г.А. Гидродинамическое излучение от треков ионизирующих частиц в стабильных жидкостях // Атом. Энергия.1957. Т. 3. №8. С. 152-153.



Секция II

**ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ В ТВЁРДОМ ТЕЛЕ**

## ПОЛЯРИЗАЦИОННОЕ ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛАХ

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

<sup>1)</sup> Лаборатория радиационной физики, НИУ БелГУ,  
Белгород, Россия

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

<sup>3)</sup> Томский политехнический университет, Томск, Россия

Поляризационное тормозное излучение (ПТИ), возникающее вследствие рассеяния кулоновского поля заряженной частицы на атомах среды, к настоящему времени достаточно полно исследовано теоретически и экспериментально для поликристаллических сред с произвольно разориентированными кристаллитами. В ряде работ показано, что в таких средах основной вклад даёт когерентная составляющая ПТИ, обусловленная периодичностью расположения атомов в отдельных кристаллитах. В текстурированных поликристаллах, в которых присутствует преимущественная ориентация кристаллитов, ситуация меняется и выход когерентной составляющей существенно зависит от угла ориентации.

Механизм образования когерентной части ПТИ аналогичен механизму параметрического рентгеновского излучения (ПРИ). В основном, ПРИ изучено для случаев взаимодействия заряженных частиц с кристаллическими мишенями. Существенно менее изученным является механизм ПТИ/ПРИ в текстурированных поликристаллах.

В работе представлены результаты исследований ПТИ релятивистских электронов в текстурированных поликристаллах. Выполнен анализ отличий характеристик ПТИ в рассматриваемом случае, ПТИ из безтекстурных поликристаллов и ПРИ из кристаллических радиаторов.

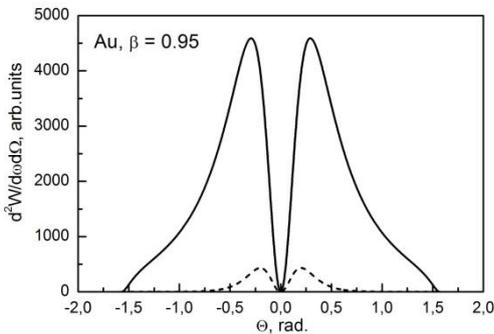
## ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ИОНОВ ПРИ ПОДХВАТЕ ИЛИ ПОТЕРЕ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД

В.С. Малышевский, И.А. Иванова

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

В работе решена задача о влиянии процессов перезарядки многозарядных ускоренных ионов в среде на характеристики переходного излучения.

Процессы подхвата или потери электрона приводят к тому, что поля в каждой из сред создаются различными ионными токами. Условие «мгновенности» подхвата, потери электронов или установления равновесного заряда иона в среде позволит тогда найти соответствующие поля из условия непрерывности нормальной и тангенциальной к поверхности раздела компонента. Задача о нахождении спектрально-угловой плотности переходного излучения иона на границе раздела двух сред в условиях возможного подхвата или потери электронов решается тогда традиционным путем расчета потока вектора Пойнтинга через удаленную поверхность.



Показано, что процессы подхвата (потери) электронов ускоренными многозарядными ионами на границе раздела двух сред существенно увеличивают выход переходного излучения при установлении равновесного заряда иона в среде.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА НА СПЕКТР  
ДИФРАГИРОВАННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ  
КВАРЦА

А.В. Вуколов<sup>1)</sup>, А.И. Новокшенов<sup>1)</sup>, А.П. Потылицын<sup>1)</sup>, Т.Р. Мурадян<sup>2)</sup>,  
А.Е. Мовсисян<sup>2)</sup>, В.Р. Кочарян<sup>1,2)</sup>

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

<sup>2)</sup> Институт прикладных проблем физики, г. Ереван, Армения

Экспериментально исследованы спектры дифрагированного рентгеновского излучения в монокристалле кварца ( $10\bar{1}1$ ) в геометрии Лауэ под воздействием температурного градиента спектрометром БДЕР-КИ-11К. с разрешением 300 эВ на линии  $\text{Am}241$  17,74 кэВ. Наличие температурного градиента приводит к увеличению интенсивности дифрагированного пучка [1-2], которая нами измерена в зависимости от температуры нагрева одной грани кристалла. Показано, что интенсивность отраженного излучения в Лауэ геометрии может возрастать на 2 порядка по сравнению с однородным температурным режимом кристалла. Получена кривая качания отраженного пучка под фиксированным углом наблюдения  $\theta^0$ , при заданном температурном градиенте. Показано, что с увеличением температурного градиента (до определенного значения) интенсивность отраженного пучка увеличивается, а спектральная ширина отраженной линии остается неизменной и определяется энергетическим разрешением спектрометра. Дальнейшее увеличение температурного градиента приводит к увеличению спектральной ширины при уменьшении интенсивности отраженного пучка.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А.Р.Мкртчян, А.Р. Аракелян, Г.А. Арутюнян Л.А. Кочарян. Письма в ЖЭТФ, т. 26, Вып. 8, 599 – 603, 1977.
2. Mkrtchyan, A.R., Navasardyan, M.A., Gabrielyan, R.G., Kocharian, L.A. & Kuzmin, R.N. *Solid State Communicaton*, **59**,147-149, 1986.

## СПЕКТР ПРОХОДЯЩЕГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ КВАРЦА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА

А.В. Вуколов<sup>1)</sup>, А.И. Новокшенов<sup>1)</sup>, А.П. Потылицын<sup>1)</sup>,  
Т.Р. Мурадян<sup>2)</sup>, С.Г. Хлопузян<sup>2)</sup>, В.Р. Кочарян<sup>1),2)</sup>

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

<sup>2)</sup> Институт прикладных проблем физики, г.Ереван, Армения

Авторы работ [1-2] измеряли интегральную интенсивность проходящего и отраженного дифрагированных рентгеновских пучков в геометрии Лауэ, для кристаллов с  $\mu t \approx 1$ , ( $\mu$  - линейный коэффициент поглощения,  $t$  - толщина кристалла) при создании температурного градиента внутри кристалла и обнаружили «эффект полной переброски излучения», при котором интенсивность проходящего пучка полностью перебрасывается в направлении отраженного пучка [2]. В настоящей работе экспериментально исследовались характеристики эффекта переброски в спектре проходящего излучения в зависимости от величины температурного градиента, воздействующего перпендикулярно отражающим атомным плоскостям ( $10\bar{1}1$ ) в кристалле кварца, с помощью полупроводникового детектора типа БДЕР-КИ-11К. Для выбранной ориентации кристалла первый порядок дифракции соответствовал энергии 35 кэВ. Именно для этой энергии в сплошном спектре проходящего пучка наблюдался провал, глубина которого определялась величиной температурного градиента и энергетическим разрешением детектора.

### ЛИТЕРАТУРА

1. A.R. Mkrtchyan, M.A. Navasardyan, R.G. Gabrielyan, L.A. Kocharian, R.N. Kuzmin, *Solid State Communication*, **59**,147-149. 1986
2. А.Р. Мкртчян, М.А. Навасардян, В.К. Мирзоян. Письма в ЖТФ, **8**, 677 (1982).

## УГЛОВОЙ МОМЕНТ ИЗЛУЧЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ В ТОНКОМ КРИСТАЛЛЕ Si

С.В. Абдрашитов<sup>1)2)</sup>, В.А. Бордовицын<sup>2)</sup>,  
Ю.Л. Пивоваров<sup>1)</sup>, Т.А. Тухфатуллин<sup>1)</sup>

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

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

Разрабатываемый группой авторов компьютерный код ВСМ-1 [1] ранее был применён для определения зависимости орбитального (ОУМ) и спинового (СУМ) угловых моментов излучения 350 МэВ электронов при плоскостном каналировании в тонком кристалле Si от угла влёта начального электронного пучка и толщины кристаллической мишени [2].

В работе при помощи развитого кода ВСМ-1 рассчитаны ОУМ и СУМ излучения релятивистских электронов с энергиями 155 и 255 МэВ при плоскостном и аксиальном каналировании в 0.7 мкм кристалле Si. Выбор энергии обусловлен программами экспериментов на ускорителях INFN-LNF (Италия) и SAGA-LS (Япония).

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Bogdanov O.V., Fiks E.I., Korotchenko K.B., Pivovarov Yu.L., Tukhfatullin T.A., //, J. of Phys.: Conf. Ser., 2010, V.236, №1; doi:10.1088/1742-6596/236/1/012029.
2. Абдрашитов С.В., Бордовицын В.А., Пивоваров Ю.Л., //, Вестник Томского государственного педагогического университета, 2014, Вып. 12 (153), С. 9-12.

ОТКЛОНЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ МИСКАТ-ПОВЕРХНОСТЬЮ  
ОРИЕНТИРОВАННОГО КРИСТАЛЛАА. А. Бабаев<sup>1)</sup>, Ж.-Л. Кавото<sup>2)</sup>, С. Б. Дабагов<sup>3),4)</sup><sup>1)</sup> Томский политехнический университет, Томск, Россия<sup>2)</sup> INFN, Sez. Roma La Sapienza, Rome, Italy<sup>3)</sup> INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, Frascati, Italy<sup>4)</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Пусть пучок заряженных частиц проникает в кристалл вдоль главных кристаллографических плоскостей. Такой кристалл называется ориентированным, а движение частиц в электрическом поле кристалла в таком случае может быть описано в терминологии каналирования /1/. Пусть поверхность кристалла образует малый угол с кристаллографическими плоскостями. Этот угол называется мискат-углом, а саму поверхность будем называть мискат-поверхностью /2/. На микроскопическом уровне мискат-поверхность представляет собой ступенчатую последовательность террас – выступающих одна из под другой кристаллографических плоскостей.

Пучок заряженных частиц в рассматриваемом случае скользит вдоль мискат-поверхности, взаимодействуя с электрическим полем террас, частично проникая в поверхностный слой кристалла. Показано, что мискат-поверхность позволяет отклонять заметную часть пучка от поверхности кристалла посредством квазиканалирования. Проанализирована возможность экспериментального наблюдения этого эффекта для позитронов с энергиями порядка 100 МэВ /2/, протонов и ядер /3/ с энергиями порядка 100 ГэВ/нуклон.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Базылев В.А., Жеваго Н.К. // УФН, 1990, 160, 47.
2. Бабаев А.А., Кавото Ж., Дабагов С.Б. // Письма в ЖЭТФ, 2014, 100, 642.
3. Babaev A., Cavoto G., Dabagov S.B. // NIM B, 2015, in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2015.01.018>.

## ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНО-УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ В HWC Si

О.В. Богданов<sup>1)</sup>, Ю.Л. Пивоваров<sup>1)</sup>, Ю. Такабаяши<sup>2)</sup>,  
Т.А. Тухфатуллин<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup> Saga Light Corp, Saga, Япония

Предположение о том, что ультратонкий полуволновой кристалл (half wave crystal - HWC) может служить для отклонения пучков частиц было сделано в /1/. В работе /2/ эта гипотеза была экспериментально подтверждена для нерелятивистских протонов с энергией 2 МэВ. В работах /3-4/ концепция каналирования в HWC расширена для легких релятивистских заряженных частиц (электронов и позитронов). Авторами было проведено компьютерное моделирование и экспериментальные исследования угловых распределений при каналировании электронов с энергией 255 МэВ в ультратонком кристалле кремния толщиной 1мкм, что превышает толщину полуволнового кристалла.

В данной работе, представлены результаты расчетов спектрально-угловых распределения излучения и рассеяния электронов и при (111) и (220) плоскостном каналировании в HWC Si толщиной 0.7 мкм, которые обладают рядом особенностей.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. E.Tsyganov, A.Taratin, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 363, 511, (1995).
2. Guidi V., Mazzolari A., De Salvador D. and Bacci L.// Phys. Rev. Lett., 2012, 108, 014801
3. Yu.L. Pivovarov and T.A. Tukhfatullin, Journ. of Phys. Conf. Ser., 517. (2014).
4. Y. Takabayashi et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B (2015) (in Press [doi:10.1016/j.nimb.2015.02.007](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.02.007)).

ВЛИЯНИЕ РАСХОДИМОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА,  
ПЕРЕСЕКАЮЩЕГО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ ПЛАСТИНКУ, НА  
СПЕКТРАЛЬНО-УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОГЕРЕНТНОГО  
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С.В. Блажевич, Т.В. Коськова, А.В. Носков

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

Развита динамическая теория когерентного рентгеновского излучения расходящегося пучка релятивистских электронов, пересекающих моно кристаллическую пластинку. Получены выражения для спектрально-угловой плотности параметрического рентгеновского излучения и дифрагированного переходного излучения релятивистского электрона с учетом отклонения направления скорости электрона относительно оси электронного пучка. Проведены численные расчеты спектрально-углового распределения плотности излучения пучка релятивистских электронов с использованием усреднения по угловому распределению релятивистских электронов в пучке в виде двумерного распределения Гаусса. Показано существенное влияние расходимости электронного пучка на спектр ПРИ, растущее при увеличении толщины. Показано, что угловая плотность ДПИ зависит от расходимости электронного пучка сильнее, чем угловая плотность ПРИ. Выявлено усиление зависимости углового разброса фотонов ДПИ от расходимости электронного пучка при увеличении энергии излучающих электронов. Показано, что при увеличении расходимости электронного пучка угловая плотность ДПИ падает более существенно, чем угловая плотность ПРИ, что можно использовать в экспериментальном исследовании ПРИ.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (проектная часть государственного задания № 3.500.2014/К в сфере научной деятельности).

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ  
СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С ПОМОЩЬЮ ОРИЕНТИРОВАННЫХ  
КРИСТАЛЛОВ

И.Е. Внуков, М.В. Выходцева, Ю.А. Гопонов,  
С.А. Лактионова, О.О. Плигина, М.А. Сиднин  
Белгородский государственный национальный  
исследовательский университет,  
г. Белгород, Россия

В последнее время в связи с проектированием Международного линейного коллайдера (ILC) /1/ возрос интерес к новым методам определения параметров пучков сверхбыстрых электронов ( $E_e \gg 1$  ГэВ) с размером порядка несколько десятков нм. Используемые в настоящее время методы диагностики пучков релятивистских электронов основаны на регистрации переходного или дифракционного излучений в оптическом диапазоне, интенсивность которых перестает линейно зависеть от числа частиц в сгустке такого размера из-за когерентных эффектов, см., например, /2/. Решением проблемы может быть переход к излучению с меньшей длиной волны /3/. В эксперименте /4/ продемонстрирована зависимость углового распределения рефлекса параметрического рентгеновского излучения от размеров электронного пучка, то есть, доказана возможность оценки параметров пучка электронов по результатам измерений угловых распределений излучения быстрых электронов в кристаллах. Обсуждаются перспективы и особенности реализации таких измерений для условий ILC.

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. Loos H. et al. // Proc. FEL'08, Gyeongju, Korea, August 2008. – THBAU01, – P. 485.
3. Gogolev A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 357(2011)
4. Kube G. et al. Proceedings of IPAC2013, 2013, p. 491. 012018.

## КОГЕРЕНТНОЕ ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ "ПОЛУГОЛОГО" ЭЛЕКТРОНА В ТОНКОМ КРИСТАЛЛЕ

А.С. Фомин<sup>1)</sup>, С.П. Фомин<sup>1,2)</sup>, Н.Ф. Шульга<sup>1),2)</sup><sup>1)</sup>ИИЦ ХФТИ, Харьков, Украина<sup>2)</sup>ХНУ, Харьков, Украина

Исследованы особенности процесса когерентного тормозного излучения ультрарелятивистского электрона в тонких кристаллических мишенях в условиях, когда заряженная частица продолжительное время находится в так называемом «полуголом» состоянии, т. е. без значительной части своего равновесного кулоновского поля /1–3/. Этот эффект является аналогом эффекта подавления тормозного излучения в тонком слое аморфного вещества (эффекта Терновского–Шульги–Фомина, см. /2–7/), существование которого было экспериментально подтверждено в работах международной коллаборации CERN NA63 /8, 9/. Оба эти эффекта необходимо учитывать при разработке детекторов для будущих ускорителей частиц высоких энергии, таких как ИС или CLIC, а также детекторов космических лучей сверхвысоких энергий. Проведен поиск оптимальных условий для экспериментального исследования эффекта подавления когерентного тормозного излучения в тонких кристаллах на пучках вторичных электронов и позитронов ускорителя SPS CERN.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Е.Л. Фейнберг, ЖЭТФ, 1966, 50, 202.
2. S.P. Fomin, N.F. Shul'ga, Phys. Lett., 1986, A 144, 148.
3. A.I. Akhiezer, N.F. Shul'ga, УФН, 1987, 151, 385.
4. F.F. Ternovskij, ЖЭТФ, 1961, 12, 123.
5. N.F. Shul'ga, S.P. Fomin, ЖЭТФ Lett., 1978, 27, 117.
6. N.F. Shul'ga, S.P. Fomin. ЖЭТФ, 1998, 86, 32.
7. A.S. Fomin, et al., Nuovo Cimento, 2011, 34 C, 45.
8. H.D. Thomsen, et al., Phys. Lett., 2009, B 672, 323.
9. H.D. Thomsen, et al., Phys. Rev., 2010, D 81, 052003.

## О ПРИМЕНЕНИИ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

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

<sup>1)</sup> Лаборатория радиационной физики, НИУ БелГУ, Белгород, Россия

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

Пироэлектрические кристаллы с размером порядка 1 см могут создавать электрические поля с напряженностью порядка 100кВ/см при изменении их температуры в вакууме. Благодаря этому, такие кристаллы используют для генерации рентгеновского излучения.[1]

Впервые исследуется генерация рентгеновского излучения от пироэлектрического кристалла в направлении назад [2], а также впервые предложен и осуществлен в эксперименте поворот внешнего пучка электронов [3]. В настоящее время готовятся публикации результатов исследований в научных журналах.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. J. D. Brownridge, Pyroelectric X-ray generator, Nature. 358 (1992) 287.
2. А.Н. Олейник, И.А. Кишин, А.С. Кубанкин, Р.М. Нажмудинов, А.В. Щагин. Наблюдение рентгеновского излучения от пироэлектрического источника в различных геометриях. Доклад на XLIV Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 27-29 мая, 2014.
3. A.S. Kubankin, R.M. Nazhmudinov, A.N. Oleinik, A.V. Shchagin, K.A. Vokhmyanina. Turning of electron beam by pyroelectric crystals, report at International conference: Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena, Italy, Capri, October 5-10, 2014.

## ИСТОЧНИК ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА И МЯГКОГО РЕНТГЕНА НА ОСНОВЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУЧКА БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЛОСКОЙ МИШЕНЬЮ В СКОЛЬЗЯЩЕЙ ГЕОМЕТРИИ

И.А. Кищин<sup>1)</sup>, М. Аль-Омари<sup>1)</sup>, А.С. Кубанкин<sup>1),2),3)</sup>, Р.М. Нажмудинов<sup>1),2)</sup>, В.И. Сергиенко<sup>1),2)</sup>, Х. Нгуен<sup>1)</sup>, Т. Фам<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Лаборатория радиационной физики, НИУ БелГУ, Белгород, Россия

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

<sup>3)</sup> Томский политехнический университет, Томск, Россия

Исследование механизмов переходного излучения и излучения Вавилова-Черенкова быстрых электронов, пересекающих плоскую границу раздела среда-вакуум под скользящими углами, показало возможность увеличения угловой плотности излучения в десятки раз за счёт трансформации конуса излучения /1,2/. Не смотря на простоту предложенных подходов, реализовать практически предложенные схемы генерации излучения затруднительно в виду необходимости изготовления достаточно тонких мишеней.

В настоящей работе приводятся результаты расчётов спектрально-угловых характеристик переходного излучения и излучения Вавилова-Черенкова для мишени, представляющей тонкий слой активного вещества, нанесённый на толстую подложку. Результаты исследования позволяют рассчитывать на возможность создания эффективных источников излучения в области 30-1000 эВ, основывающихся на взаимодействии быстрых электронов с веществом.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. A. Kubankin, N. Nasonov, V. Kaplin, S. Uglov, M. Piestrup, C. Gary // *Radiation Physics and Chemistry*, 2006, V. 75, P.913.
2. А.С. Кубанкин // *Письма в ЖТФ* – 2008. – Т.34. – Вып.21. – с.46-51.

## ИЗЛУЧЕНИЕ КАНАЛИРОВАННОЙ ЧАСТИЦЫ В ДВУХЪЯМНОМ ПОТЕНЦИАЛЕ КАК КРИТИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ О НАЛИЧИИ ИЛИ ОТСУТСТВИИ ЗОН

Н.П. Калашников, Е. А. Мазур  
Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва,  
Россия

Рассматриваются квантовые эффекты в излучении электрона при плоскостном каналировании в усредненном вдоль направления движения плоскостном потенциале кристалла, состоящем из двух неэквивалентных ям. При этом квантовые состояния каналированной частицы (КЧ) в таком потенциале рассматриваются в рамках двух различных подходов: 1. в виде уровней в ямах; 2. в виде зон поперечного движения, когда волновая функция КЧ размазана по всему кристаллу, а не локализована в конкретной яме, образованной усредненным ионным потенциалом. Рассмотрена вероятность туннелирования квантовой КЧ с учетом ее кильватерного потенциала через потенциальный барьер, образованный усредненным потенциалом кристалла. Показано, что, в отличие от каналирования частицы в одноямном кристаллическом потенциале, в случае каналирования частицы в таком двухъямном потенциале спектр излучения КЧ резко отличается в рамках этих двух обычно применяемых подходов. Предложен критический эксперимент, в котором бы четко выявилось, что же в реальности представляет собой волновая функция КЧ в кристалле. В качестве такого эксперимента предложен эффект излучения при каналировании КЧ в достаточно непростом двухъямном потенциале кристалла с двумя неэквивалентными ямами с резко отличающимся спектром уровней в каждой из них. При этом: в случае 1. спектр излучения соответствовал бы переходам между уровнями КЧ в каждой из ям. Туннелированием КЧ между ямами можно было бы пренебречь. В случае 2. образуется зонный спектр КЧ с положением зон, соответствующим наложению спектров уровней КЧ в каждой из ям. В этом случае спектр излучения будет начинаться с меньших частот и будет содержать большее число гармоник. Из факта соответствия спектра излучения КЧ в двухъямном потенциале одному из двух предложенных сценариев следует сделать однозначный вывод о наличии или отсутствии зон поперечного движения КЧ в кристалле.

## ОРИЕНТАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РОЖДЕНИЯ И АННИГИЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ ПАР В МОНОКРИСТАЛЛЕ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Калашников Н.П., Ольчак А.С.

Национальный исследовательский ядерный университет НИЯУ МИФИ 115409, Москва, Каширское шоссе 31, kalash@mephi.ru.

Одной из актуальных проблем астрофизики является определение положения источников жесткого гамма-излучения в диапазоне 10 – 100 ГэВ. В докладе предлагается исследование ориентационной зависимости вероятности образования электрон-позитронной пары в монокристалле жесткими гамма-квантами. Теория возмущений не применима для описания взаимодействия быстрых заряженных частиц с атомами кристаллографической решетки. Взаимодействие же с электромагнитным полем жесткого фотона можно рассматривать как возмущение, т.к. можно пренебречь процессами одновременного поглощения двух или более фотонов. Использование точных волновых функций поперечного движения каналированных частиц образованной пары позволяет получить вероятность образования пары, которая на два порядка превосходит вероятность образования пары в аморфной мишени. Полуширина максимума по порядку величины совпадает с критическим углом каналирования Линдхарда. Показано, что наряду с относительно большими характерными углами когерентного взаимодействия заряженных частиц с кристаллографическими осями, особую роль в ориентационной зависимости должны играть углы, сопоставимые с критическим углом каналирования Линдхарда. Оцениваются характерные энергии частиц, при которых могут проявляться вышеупомянутые эффекты:  $E > m_e^2 c^4 / U \sim 5 - 10$  ГэВ (здесь  $m_e$  – масса лептона,  $U \sim 20-50$  эВ – характерная потенциальная энергия для плоскостного канала в кристалле,  $c$  – скорость света).

Хорошо известно, если электрон и позитрон являются свободными, то аннигиляция с испусканием одного фотона невозможна, так как этот процесс не допускается законами сохранения энергии и импульса. При столкновении каналированного позитрона (у которого поперечное движение является связанным) со свободным электроном возможна однофотонная аннигиляция, которая описывается диаграммой Фейнмана с одной вершиной. В докладе анализируется процесс однофотонной аннигиляции электрон-позитронных пар, когда один позитрон движется в режиме плоскостного каналирования.

## КЛАССИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РАССЕЯНИИ ГАММА-КВАНТОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ НА МОНОКРИСТАЛЛЕ

Н.П.Калашников, А.С.Ольчак

Национальный исследовательский ядерный университет НИЯУ МИФИ  
115409, Каширское шоссе 31, Москва, Россия. e-mail: asolchak@mephi.ru,

Традиционно принято считать, что классические волновые свойства (отражение, преломление, интерференция и др.) проявляются при взаимодействии квантов электромагнитного излучения с веществом только до определенных энергий (до рентгеновского диапазона), пока длина волны фотона больше или сопоставима с межатомными расстояниями  $d \sim 10^{-10}$  м в конденсированном веществе (см., например, /1/). В докладе, используя специальную релятивистскую сопутствующую систему отсчета /2/ показано, что при скользких углах падения на гладкую поверхность монокристалла могут наблюдаться классические эффекты отражения и интерференции даже для гамма-квантов очень высоких энергий ( $E_\gamma \sim 10^{11}$  эВ). Получены оценки характерных углов  $\theta \ll (2hc/E_\gamma d)^{1/2}$ , при которых могут наблюдаться классические волновые эффекты. Обсуждается возможность использования эффекта в гамма-астрономии, наряду с эффектом рождения лептонных пар в ориентированном монокристалле /3/.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M. The Feynman Lectures on Physics including Feynman's Tips on Physics: The Definitive and Extended Edition. Addison-Wesley publishers, Massachusetts, London. 1964 (2nd edition, 2005).
2. Kalashnikov N.P., Olchak A.S. Interaction of high energy gamma-quanta with crystal surface: Classical reflection and interference phenomena.// NIM B, 2015, NIMB60846 (in press).
3. Гальпер А.М. , Калашников Н.П., Мулярчик Е.И., Рождение электрон-позитронных пар жестким фотонам в ориентированном монокристалле. // Вестник НИЯУ МИФИ, 2014, т.3, №5, стр.1-5.

## ПРОЯВЛЕНИЕ СПЕКТРА ВОЗБУЖДЕНИЙ КРИСТАЛЛА В ИЗЛУЧЕНИИ ОРИЕНТИРОВАННОЙ ЧАСТИЦЫ

Е.А. Мазур

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва,  
Россия

Рассмотрены процессы генерации фононов и электронных возбуждений в кристалле квантовой ориентированной частицей. Получены выражения для вероятности испускания фононов и плазмонов каналированной частицей. Разработана теория процессов возбуждения кристалла каналированной частицей, сопровождающихся одновременным излучением фотона. Доказано, что все особенности электронной и фононной структуры спектра возбуждений кристалла проявляются в излучении как компоненты излучения ориентированной быстрой заряженной частицы. Рассмотрен процесс испускания фотона квантовой ориентированной быстрой заряженной частицей, сопровождающийся возбуждением плазмонов в кристаллической мишени. Учтен факт того, что энергия плазмона в кристалле одного порядка с глубиной потенциальной ямы, в которой движется каналированная частица. Учитывается также факт слабой дисперсии плазмонов в кристалле, что приводит к появлению характерной энергии в виде постоянной энергии плазмонов. Показано, что быстрая заряженная частица в системе покоя испускает фотоны с энергией, равной разности энергий между двумя квантовыми уровнями поперечного движения за вычетом энергии плазмонов. Исследованы характеристики фотон-плазмонного излучения.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВУФ ИЗЛУЧЕНИЯ 5,7 МэВ ЭЛЕКТРОНОВ ВБЛИЗИ $L$ -КРАЯ ПОГЛОЩЕНИЯ $Al$

С.Р. Углов, А.В. Вуколов, В.В. Каплин, Л.Г. Сухих  
Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Представлена схема эксперимента и результаты тестовых измерений выхода ВУФ излучения вблизи направления выхода излучения Вавилова-Черенкова, генерируемого электронами с энергией 5.7 МэВ в  $Al$  фольге толщиной 9  $\mu m$ . Исследование проводилось на выведенном пучке микротрона М-5 (ТПУ, Томск). Интенсивность ВУФ излучения исследовалась с помощью многослойного  $Mo/Si$  зеркала, располагавшегося в заданном фрагменте конуса ВУФ излучения, испущенного из мишени. Для регистрации излучения использовался вторичный электронный умножитель ВЭУ-6.

Предварительно, для определения необходимой геометрии эксперимента и обнаружения ожидаемого эффекта в измеряемом угловом распределении ВУФ излучения, отраженного многослойным  $Mo/Si$  зеркалом, 2D паттерны угловых распределений были рассчитаны, используя теорию /1/ для расчета интенсивности излучения, генерируемого электронами в  $Al$  мишени, а также и теорию дифракции ВУФ излучения на многослойном зеркале /2/.

Профили углового распределения ВУФ излучения, отраженного  $Mo/Si$  зеркалом, измерены для нескольких ориентаций зеркала. Приводится сравнение результатов эксперимента и расчета.

Работа выполнена при частичной поддержке ГЗ НИР МОН № 2456 и гранта РФФИ № 14-02-01032.

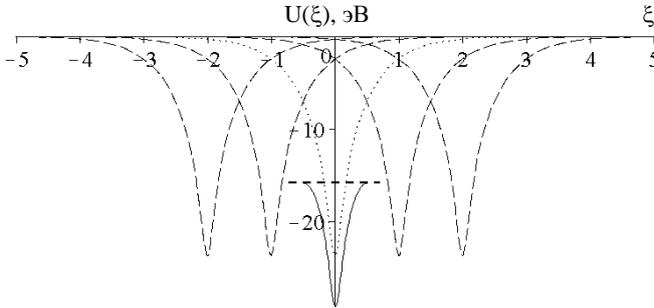
### ЛИТЕРАТУРА

1. Пафомов В.Е.// Труды ФИАН, 1969, Т. XLIV, С.28.
2. Виноградов А.В., Кожевников И.В.// Труды ФИАН, 1989, Т. 196, С. 63.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА УРОВНЕЙ ЭНЕРГИИ И ВОЛНОВЫХ ФУНКЦИЙ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ПЛОСКОСТНЫХ И ОСЕВЫХ ПОТЕНЦИАЛАХ В РАМКАХ ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ

Н.В. Максютя, В.И. Высоцкий, С.В. Ефименко  
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

Традиционный метод расчета [1] уровней энергии (УЭ) и соответствующих волновых функций (ВФ) частиц при каналировании связан с использованием различных аппроксимационных потенциалов (при плоскостном каналировании электронов  $U(\xi) = -U_0/\text{ch}^2(\xi/b)$ ), что справедливо только для неограниченного идеального кристалла. На рисунке этот потенциал для плоскости (100) в кристалле кремния изображен сплошной кривой.



В данной работе предлагается новая методика расчета УЭ и ВФ на основе стационарной теории возмущений: численные решения для УЭ и ВФ в плоскостном потенциале, изображенном пунктирной кривой, находятся с учетом влияния потенциалов ближайших плоскостей (штриховые кривые) или осей (при осевом каналировании).

С помощью состояний в окрестности штриховой линии можно корректно рассчитывать спектры КХИ, исследовать надбарьерное зависание частиц, а также учитывать краевые эффекты.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

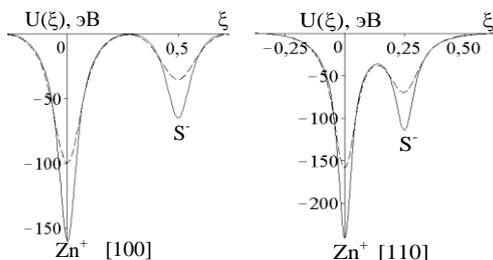
1. Базылев В.А, Жеваго Н.К. Излучение быстрых частиц в веществе и во внешних полях. М.: Наука, 1987, 272 с.

## ИЗЛУЧЕНИЕ ЧАСТИЦ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ В ГЛАВНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ОСЯХ КРИСТАЛЛОВ СО СТРУКТУРОЙ ЦИНКОВОЙ ОБМАНКИ

Н.В. Максютя, В.И. Высоцкий, С.В. Ефименко

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

В [1] изучались аномальные особенности потенциалов взаимодействия электронов с заряженными плоскостями и осями кристаллов со структурой цинковой обманки. В [2] проводился расчет спектров квазихарактеристического излучения (КХИ), возникающих при каналировании релятивистских электронов в заряженных плоскостях этих кристаллов. В данной работе рассчитываются потенциалы взаимодействия электронов с главными заряженными осями [100] и [110] кристаллов со структурой цинковой обманки. Их вид в главных сечениях (110) и (100) в относительных единицах  $\xi = x/a$  ( $a$  – постоянная решетки) показан на рисунке для кристалла ZnS при  $T = 300\text{ К}$  (сплошные кривые) и при  $T = 1000\text{ К}$  (штриховые кривые).



Производится расчет поперечных энергетических уровней, а также спектров КХИ, возникающих при каналировании релятивистских электронов в этих осях.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Максютя Н.В., Высоцкий В.И., Головач Г.П. // Тез. докл. ХLI межд. конф. по физике взаимод. заряд. частиц с кристаллами // М.: Изд-во МГУ, 2011, С. 31.
2. Максютя Н.В., Высоцкий В.И., Головач Г.П., Ефименко С.В. // Тез. докл. ХLII межд. конф. по физике взаимод. заряд. частиц с кристаллами // М.: Изд-во МГУ, 2011, С. 50.

РАЗВИТИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО  
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОНА В  
ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СЛОИСТОЙ СРЕДЕ В УСЛОВИЯХ МНОГОКРАТНОГО  
РАССЕЯНИЯ

С.В. Блажевич, Т.В. Коськова, С.Н. Немцев,  
А.В. Носков

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Белгород, Россия

Развита динамическая теория когерентного рентгеновского излучения релятивистского электрона, пересекающего периодическую слоистую среду в условиях многократного рассеяния релятивистских электронов на атомах мишени. Используется традиционный метод усреднения сечений излучения по расширяющемуся пучку прямолинейных траекторий электронов, не учитывающий вклада дифрагированного тормозного излучения (ДТИ) в полный выход. Получен критерий вклада ДТИ в выход излучения из периодической слоистой среды, который использован для доказательства отсутствия вклада ДТИ в выход излучения в определенных условиях. Получены и исследованы аналитические выражения для спектрально-угловой плотности параметрического рентгеновского излучения и дифрагированного переходного излучения в условиях многократного рассеяния. Предсказан интересный эффект, заключающийся в том, что при увеличении начальной расходимости электронного пучка, существенно растет не только ширина спектра ПРИ, но и его амплитуда.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (проектная часть государственного задания № 3.500.2014/К в сфере научной деятельности).

КОГЕРЕНТНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО  
ЭЛЕКТРОНА В ТРЕХСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЕ «АМОРФНЫЙ СЛОЙ-  
ВАКУУМ-ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СЛОИСТАЯ СРЕДА»

С.В. Блажевич, Ю.П. Гладких, Р.А. Загороднюк,  
С.Н. Немцев, А.В. Носков

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Белгород, Россия

Развита динамическая теория когерентного рентгеновского излучения релятивистского электрона, пересекающего трехслойную структуру, состоящую из аморфного слоя, вакуумного слоя и слоя периодической слоистой среды. В рамках двухволнового приближения динамической теории дифракции рентгеновских волн в кристалле получены выражения, описывающие амплитуды дифрагированного переходного излучения (ДПИ) и параметрического рентгеновского излучения (ПРИ). Получены и исследованы выражения, описывающие спектрально-угловые распределения ДПИ, ПРИ и их интерференции в рассматриваемой структуре. Показана возможность существенного увеличения спектрально-угловой плотности ДПИ за счет конструктивной интерференции волн ПИ, генерируемых на границах аморфного слоя.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (проектная часть государственного задания № 3.500.2014/К в сфере научной деятельности).

**Секция III**

**ПОВЕРХНОСТЬ, РАССЕЯНИЕ, РАСПЫЛЕНИЕ, ЭМИССИЯ  
ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ И РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ**



## МОДИФИКАЦИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА

В.С. Ковивчак, Т.В. Панова, А.В. Попов  
Омский государственный университет  
им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

Изменение морфологии и структурно-фазового состояния поверхностных слоев поликристаллических полупроводниковых оксидов металлов под действием мощного ионного пучка (МИП) представляет интерес для случая их использования в качестве чувствительных материалов газовых и химических сенсоров.

Исследовано воздействия импульсного протон-углеродного пучка (30%  $H^+$  +70%  $C^+$ ,  $E = 200$  кэВ,  $j \leq 150$  А/см<sup>2</sup>,  $\tau=60$  нсек) на поликристаллические  $V_2O_5$ ,  $MoO_3$ ,  $WO_3$ . Поверхность облученных материалов исследовали с помощью растровой электронной микроскопии (JSM-6610LV, "JEOL" с энергодисперсионным анализатором Inca-350). Структурно-фазовый состав определялся на рентгеновском дифрактометре Дрон-3М.

Установлено, что воздействие МИП на эти оксиды приводит к изменению оптических характеристик поверхности. Так исходная окраска переходит в темно-синюю (для  $V_2O_5$ ) или темно-зеленую (для  $MoO_3$ ,  $WO_3$ ). При плотности тока пучка  $\sim 30$  А/см<sup>2</sup> на всех исследованных материалах наблюдается оплавление с частичным сплавлением частиц оксидов и образованием поверхностных пор. В тоже время на поверхности  $V_2O_5$  при однократном воздействии МИП с плотностью тока пучка 50 А/см<sup>2</sup> наблюдается образование наностержней и массивов нанопластин с характерной толщиной  $\sim 40$  нм. При увеличении плотностью тока пучка до 100 А/см<sup>2</sup> нанопластины локально формируются вокруг поверхностных трещин, образовавшихся при воздействии МИП. Рост этих наноструктур, вероятно, происходит вследствие обратного осаждения паров  $V_2O_5$  и продуктов его разложения (имеющих высокое давление насыщенного пара) на облученную поверхность.

## ВОЗДЕЙСТВИЕ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА НА ТОНКИЕ СЛОИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ, НАНЕСЕННЫЕ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОДЛОЖКИ

В.С. Ковивчак<sup>1,2)</sup>, Ю. Г. Кряжев<sup>2)</sup>, Е.С. Мартыненко<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Омский государственный университет

им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

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

<sup>3)</sup> Институт проблем переработки углеводов СО РАН,  
г. Омск, Россия

Интерес к изменениям, происходящим в полимерных пленках (и композициях на их основе) при воздействии концентрированных потоков энергии обусловлен большими перспективами применения последних для трансформации пленок полимерных композитов в тонкие слои наноструктурированного углерода для применения в электронике.

Исследовано воздействие импульсного протон-углеродного пучка (30%  $H^+$  + 70%  $C^+$ ,  $E = 200$  кэВ,  $j \leq 150$  А/см<sup>2</sup>,  $\tau=60$  нсек) на тонкие слои хлорированного поливинилхлорида (ХПВХ), полиметилметакрилата (ПММА) содержащие ферроцен ( $Fe(C_5H_5)_2$ ) в качестве катализатора. Слои полимеров (толщиной до 5 мкм) наносились из раствора на подложки из стекла и ситалла.

Установлено, что однократное воздействие МИП с  $j \sim 100$  А/см<sup>2</sup> на пленку ХПВХ с добавкой ферроцена приводит к формированию на ее поверхности массивов углеродных нанотрубок (нановолокон) с характерным диаметром 30-250 нм и длиной до 10 мкм. При воздействии МИП на пленку чистого ХПВХ наблюдается только образование пор различных размеров. В тоже время воздействие МИП с  $j \geq 50$  А/см<sup>2</sup> на пленки ПММА, как без добавок, так и содержащие ферроцен, приводит лишь к интенсивному порообразованию в поверхностном слое. Характерный размер пор составляет  $\sim 3$  мкм.

Обсуждены возможные механизмы образования углеродных наноструктур волокнистого типа при воздействии МИП на полимерные композиты ХПВХ - ферроцен.

## СТОЙКОСТЬ ПОЛИИМИДНЫХ ПЛЕНОК К ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМУ ОБЛУЧЕНИЮ ПРОТОНАМИ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ И КИСЛОРОДНОЙ ПЛАЗМОЙ

Л.С. Новиков<sup>1)</sup>, В.Н. Черник<sup>1)</sup>, Л.А. Жиляков<sup>1)</sup>,  
Е.Н. Воронина<sup>1)</sup>, Н.А. Беляева<sup>2)</sup>

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

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

В докладе представлены результаты экспериментального исследования полиимидных пленок при комбинированном облучении протонами с энергией 500 кэВ и кислородной плазмой с энергией частиц ~20 эВ. Облучение образцов протонами с флюенсами  $10^{14}$ –  $10^{16}$  см<sup>-2</sup> производилось на каскадном генераторе КГ-500 НИИЯФ МГУ, затем образцы подвергались воздействию потока атомов и ионов кислорода с флюенсом  $(1-5) \cdot 10^{20}$  см<sup>-2</sup> на магнитоплазодинамическом ускорителе НИИЯФ МГУ [1]. Образцы исследовались с помощью оптического, атомно-силового и сканирующего электронного микроскопов.

Полученные результаты показали, что с ростом флюенса протонов при последующем облучением потоком сверхтепловых частиц кислородной плазмы потери массы полиимидной пленки возрастают. Так, при флюенсе протонов  $10^{16}$  см<sup>-2</sup> было зафиксировано увеличение объемного коэффициента эрозии материала на 20% от первоначального значения. Наблюдалось разрушение кислородной плазмой центров окраски, образующихся в приповерхностных слоях в результате облучения протонами /1/, что приводило к заметному изменению оптических свойств пленок. В докладе также представлены данные об структурных изменениях поверхности пленок до и после воздействия ионизирующих излучений.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Модель космоса. Т. 2 Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Под ред. Л.С. Новикова. М.: КДУ, 2007, 1144.

## РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ РАСПЫЛЕНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ МИШЕНЕЙ ПОТОКАМИ ЛЕГКИХ ИОНОВ И ПЛАЗМЫ

А.А. Барат, В.В. Манухин  
ФГБОУ ВПО НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Физическое распыление является одним из наиболее существенных процессов, ведущих к эрозии конструкционных материалов, взаимодействующих с плазмой. Кроме того, появление тяжелых распыленных примесей в пристеночной области во многом определяет энергетическое время удержания плазмы.

Поскольку кандидатные материалы для диверторных пластин и первой стенки ТОКАМАКа весьма разнообразны, необходимо развивать методы, позволяющие точно вычислить энергетическое и угловое распределение распыленных атомов без существенных затрат машинного времени.

В /1/ предложена методика расчета энергетического спектра распыления плоскопараллельного слоя однородного материала на основе метода инвариантного погружения. В данной работе предложенная методика обобщается на случай двухкомпонентной мишени. Кроме того, граничные условия для уравнения переноса, такие как энергетическое и угловое распределение бомбардирующих поверхность ионов и их флюенс выбирались в соответствии с реальными условиями ТОКАМАКа /2/. Результаты расчетов находятся в приемлемом согласии с результатами компьютерного моделирования /3/, несмотря на сильно упрощенную трехпотокую модель углового рассеяния.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В.В. Манухин, А.А. Барат, М.К. Губкин // Известия РАН. Серия физическая, 2010, том 74, № 2, с. 254.
2. J.N. Brooks, D.N. Ruzic, D.B. Hayden // Fusion Engineering and Design 1997, v.37, p. 455.
3. Philipps V. // Transactions of Fusion Science and Technology. 2004, v.45, p.237.

## СТРУКТУРА И ПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗА ПРИ ВЫСОКОДОЗОВОМ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

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

<sup>1)</sup> МАТИ-РГТУ имени К.Э. Циолковского, Москва, Россия

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

<sup>3)</sup> Физический факультет ННГУ имени Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>4)</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск, Россия

Графитизация алмазных материалов представляет интерес для создания приборов со структурами алмаз-графит /1/. Исследования высокодозовой ионно-лучевой модификации грани (111) синтетического алмаза 1b ионами аргона энергии 30 кэВ с использованием ионных пучков и оптической спектроскопии позволяют предположить, что при конечной температуре облучения 400<sup>o</sup>С образуется поверхностный слой турбостратного графита /2/. Это подтверждают проведенные в настоящей работе исследования модифицированного слоя с использованием метода дифракции быстрых отраженных электронов и установки Nanometrics HL5500, позволяющей измерять слоевое сопротивление 0.1 – 10<sup>11</sup> Ом/кв. Дифракционная картина содержит два размытых кольца, характерных для двумерного упорядочения углерода в стеклоуглеродах /3/. Слоеое сопротивление ~ 500 Ом/кв в предположении толщины слоя 30 нм (проективный пробег ионов аргона) соответствует характерному удельному сопротивлению углеграфитовых материалов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Popov V.P., Safronov L.N., Naumova O.V. et al. // Nucl.Instrum.Methods in Phys.Res. В.2012. V.282. P.100.
2. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Казаков В.А., Машкова Е.С., Попов В.П., Ризаханов Р.Н., Сигалаев С.К. // Тр. 15 Межвуз. науч. шк. молодых спец. «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» М.: Университетская кн., 2014. С.126.
3. Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С. // Поверхность. 2008. № 1. С.58.

## ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ БОРА НА СВОЙСТВА АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОК

О.А.Подсвилов<sup>1)</sup>, П.А.Карасёв<sup>1)</sup>, Е.Н.Шубина<sup>1)</sup>, М.В.Мишин<sup>1)</sup>, А.В.Поздняков<sup>1)</sup>,  
А.Я.Виноградов<sup>2)</sup>, М.В.Просников<sup>2)</sup>, Н.Н.Карасёв<sup>3)</sup>, А.И.Титов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Государственный политехнический университет, С.-Петербург

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

<sup>3)</sup> Государственный университет информационных технологий, механики и оптики, С.-Петербург

Углеродсодержащие пленки осаждались из чистого метана и из газовой смеси с добавками к нему диборана методом ВЧ (13,56 МГц) плазмохимического осаждения /1/ на подложки чистого и окисленного до толщины 0,7 мкм Si при температуре 300<sup>0</sup>С. Готовые пленки дополнительно облучались ионами азота и бора с энергиями 25-100 кэВ. Исследования структуры проводились методами сканирующей электронной микроскопии, ИК спектроскопии, комбинационного рассеяния света. Поверхностное сопротивление измерялось четырехзондовым методом, в том числе и в зависимости от температуры. Остаточные напряжения измерялись по изгибу подложек интерферометрическим методом.

Обнаружено, что добавление примеси к рабочему газу снижает скорость роста плёнки. Остаточные сжимающие механические напряжения в плёнках вначале понижаются с увеличением концентрации примеси, потом начинают расти. Также ведет себя поверхностное сопротивление. На спектрах ИК поглощения обнаружены два пика, соответствующие различным конфигурациям связей В-С (1100 и 1200 см<sup>-1</sup>). Причем второй появляется и начинает расти от концентрации ~10 об.% диборана в рабочем газе. Эта же концентрация соответствует экстремуму на остальных зависимостях.

Облучение ускоренными ионами не влияет на поглощение пленок в ИК диапазоне.

## ЛИТЕРАТУРА

1. О.А. Podsvirov, P.A. Karasev, A.Ya. Vinogradov et al. // NIMB (2010) 268 3107.

## ПЛАНАРИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ГАЗОВЫМИ КЛАСТЕРНЫМИ ИОНАМИ

А.Е. Иешкин<sup>1)</sup>, Д.С. Киреев<sup>1)</sup>, Ю.А. Ермаков<sup>2)</sup>, В.С. Черныш<sup>1)</sup>

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

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

В последние десятилетия активно ведутся исследования закономерностей взаимодействия кластерных ионов с поверхностью твердого тела. Пучки газовых кластерных ионов уже нашли применение для имплантации вещества на сверхмалые глубины, для ассистирования при напылении тонких пленок, в качестве зонда в методике ВИМС /1/. В докладе рассмотрены перспективы применения кластерных ионов для сглаживания рельефа поверхности различных материалов (металлов, полупроводников и диэлектриков простого и сложного состава) до среднего уровня шероховатости не более нескольких ангстрем.

В докладе описаны принципы построения ускорителей газовых кластерных ионов и их основные характеристики. Приведены экспериментальные данные и результаты компьютерного моделирования взаимодействия ускоренных кластеров с мишенями. Выполнен анализ существующих методов шлифовки поверхности и исследования ее топологии и показано, что шлифовка кластерными ионами обеспечивает более высокую степень гладкости поверхности при малой толщине дефектного слоя.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Yamada I. // Appl. Surf. Sci., 2014, v. 310, p. 77.

## НАКОПЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ НАРУШЕНИЙ У ПОВЕРХНОСТИ Si ПРИ ИМПЛАТАЦИИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ИОНОВ

К.В. Карабешкин, П.А. Карасёв, А.И. Титов  
Государственный политехнический университет,  
Санкт-Петербург, Россия

Исследовалось накопление структурных нарушений при облучении (001) Si ионами  $P^+$ ,  $PF_4^+$  с энергиями от 0.6 до 3.2 кэВ/а.е.м при комнатной температуре. Для измерения распределений радиационных повреждений по глубине использовалось резерфордовское обратное рассеяние быстрых ионов гелия в сочетании с каналированием.

По сравнению с работой [1] существенно расширен диапазон использованных доз и выполнены исследования зависимости эффективности радиационного повреждения от плотности потока внедряемых ионов.

Показано, что в отличие от бимодального распределения дефектов, характерного для бомбардировки атомарными ионами, в случае облучения Si молекулярными ионами  $PF_4$  наблюдается распределение практически с одним максимумом, который находится у поверхности.

Площадь под этим поверхностным максимумом при внедрении молекулярных ионов существенно превосходит подобную площадь при облучении ионами P.

Установлено, что изменение плотности потока ионов не влияет на данную площадь.

Результаты объясняются нелинейностью каскадов смещений, формируемых при облучении молекулярными ионами.

Работа поддержана грантом РФФИ № [14-08-01256](#).

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. К.В. Карабешкин, П.А. Карасёв, Л.М. Никулина, А.И. Титов // Тезисы докладов XLIII Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М.: МГУ, 2013. С. 83.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЕВ SiGe-НА-ИЗОЛЯТОРЕ НАНОМЕТРОВОЙ ТОЛЩИНЫ МЕТОДОМ РАССЕЯНИЯ ИОНОВ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ

И.Е. Тыщенко<sup>1)</sup>, T.S. Ávila<sup>2)</sup>, P.L. Grande<sup>2)</sup>, В.П. Попов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Институт физики полупроводников им А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2)</sup> Institute of Physics, UFRGS, Porto Alegre, 9500, Brazil

Формирование полупроводниковых гетероструктур SiGe рассматривается как эффективный способ увеличения подвижности носителей заряда в наноразмерном канале МДП транзистора. При этом одной из ключевых проблем является проблема планарной совместимости материалов. Решение этой проблемы может быть достигнуто за счет ионного синтеза промежуточных слоев Ge на границе раздела Si/SiO<sub>2</sub>. В данной работе были изучены напряжения в ионно-синтезированных нанометровых слоях SiGe-на-изоляторе методом рассеяния ионов средних энергий.

Структуры были созданы имплантацией ионов Ge<sup>+</sup> с энергией 40-80 кэВ дозой  $(1.6-2.3) \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> в термически выращенные слои SiO<sub>2</sub> толщиной около 0.4 мкм и на имплантированный слой переносилась пленка монокристаллического Si толщиной ~0.5 мкм. Формирование слоя Ge на границе Si/SiO<sub>2</sub> происходило в процессе последующего отжига при температуре 850-1100° С в течение от 20 минут до 20 часов. После отжига толщина пленки кремния утончалась до 1-21 нм методом анодного окисления и последовательного удаления в HF окисленного слоя. Анализ слоев проводился методом малоуглового рассеяния ионов He<sup>+</sup> с энергией 150 кэВ. Исследование карты распределения обратно рассеянных частиц в зависимости от угла анализа позволило определить значения деформаций, возникающих в пленках SiGe. Обнаружено, что с ростом температуры и длительно отжига и толщины слоя SiGe в пленках могут возникать деформации как перпендикулярные к её поверхности, так и в плоскости пленки.

## ВЛИЯНИЕ КАНАЛИРОВАНИЯ НА ПРОФИЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСИ И РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ В МОНОКРИСТАЛЛ КРЕМНИЯ

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

<sup>1)</sup> НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

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

<sup>3)</sup> Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

На базе ускорителя HVEE на 500 кэВ создана экспериментальная линия, позволяющая проводить ионную имплантацию и изучать создаваемые структуры методом резерфордовского обратного рассеяния в сочетании с каналированием. Проведены эксперименты по внедрению тяжелых ионов Хе в монокристаллический кремний (110) с энергиями в диапазоне 100 - 300 кэВ и дозами порядка  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> при комнатной температуре. Облучение проводилось в направлении главной кристаллографической оси и в направлении, не содержащем выделенных каналов.

В работе представлены результаты изучения влияния направления имплантации, дозы и энергии внедряемых ионов на профиль распределения примеси, а также профиль распределения радиационно-стимулированных дефектов методом резерфордовского обратного рассеяния. Рассматривался процесс разориентации кристаллической решетки под воздействием ионного облучения в зависимости от параметров пучка и направления облучения.

Представленно сравнение полученных экспериментальных результатов с моделированием рассматриваемых процессов в программах, позволяющих учесть параметры эксперимента.

## ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ГРАФИТА.

И.Н. Пашков<sup>2)</sup>, Е.А. Лигачева<sup>1)</sup>, А.Е. Лигачев<sup>3)</sup>,

<sup>1)</sup> Московский авиационный технологический институт им. К.Э.Циолковского,  
г. Москва

<sup>2)</sup> НИТУ Московский институт стали и сплавов.

<sup>3)</sup> Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН. г. Москва, [carbin@yandex.ru](mailto:carbin@yandex.ru)

Рельеф поверхности и её химический состав влияют на смачивание твердого тела жидкостью. Для исследования влияния этих факторов на процессы смачивания и растекания была выбрана модельная система «медь — графит». Поверхность смачивания (графит марки S7, произведен в Японии)) обрабатывали ионами газов (аргона, азота) и металлов - титана, олова, свинца, которые отличаются друг от друга массой и характером взаимодействия с углеродом. Обработка графита вышеперечисленными ионами осуществляли в вакууме не хуже  $3-5 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. с помощью плазменного источника ионов с полым катодом (Институт электрофизики УРО РАН).

В результате исследования структуры поверхности графита до и после обработки ионами Ag, N, Ti, Sn, Pb, а также межфазной границы «графит-капля» установлено, что ионы металлов проникают на глубину не более 80 -100 нм, структура приповерхностного слоя графита толщиной 2-4 мкм практически не меняется.

На межфазной поверхности «графит-капля» (в порах приповерхностного слоя графита и на участках поверхности подложки не контактирующих с медью в результате отсутствия смачивания графита медью) формируются частицы меди на размер которых изменяется от нескольких единиц до сотни нанометров.

## МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНАМИ СЕРЕБРА

В.В. Воробьев<sup>1)</sup>, Ю.Н. Осин<sup>1)</sup>, В.Ф. Валеев<sup>2)</sup>, В.И. Нуждин<sup>2)</sup>, А.Л. Степанов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

<sup>2)</sup> Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН,  
Казань, Россия

Ранее было показано, что методом высокодозовой низкоэнергетической имплантацией ионами металлов может быть сформирована пористая структура в-приповерхностном слое Si /1/. В настоящей работе была проведена имплантация монокристаллического Si на ионном ускорителе ИЛУ-3 ионами  $Ag^+$  с энергией 30 кэВ при дозе облучения от  $6.25 \times 10^{13}$  до  $1.5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>, но при меньшем чем в /1/ плотности тока в ионном пучке 2 мкА/см<sup>2</sup>. Морфологические и структурные исследования полученных образцов проводились на растровом электронном микроскопе Merlin (Carl Zeiss), оснащенный детектором дифракции отраженных электронов NordLys HKL (Oxford Instruments).

Установлено, что при облучении Si дозой  $6.25 \times 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> происходит разрушение кристаллической структуры и частичная аморфизация в приповерхностной области Si, но при этом поверхность остается гладкой и ровной. При увеличении дозы облучения на дифракционной картине Si наблюдается размытие линий Кикучи и появление интенсивных диффузных колец от аморфизованного слоя. На дифракционной картине Si имплантированного  $1.5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> присутствуют только диффузные кольца, указывающих на практически полную аморфизацию имплантированного слоя Si. При этом морфология поверхности Si характеризуется ярко-выраженной пористой структурой.

Работа поддержана грантом РФФИ 13-02-12012\_офи.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. A.L. Stepanov et al. // Optoelectronics and Advanc. Mater. – Rapid Comm, 2013, V. 7, № 9-10, P. 692-697.

СТРУКТУРНЫЕ И МАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РУТИЛА (TiO<sub>2</sub>),  
ИМПЛАНТИРОВАННОГО ВАНАДИЕМ

И.Р. Вахитов<sup>1)</sup>, В.И. Нуждин<sup>2)</sup>, Б.З. Рамеев<sup>2)</sup>, А.А. Шемухин<sup>3)</sup>, Л.Р. Тагиров<sup>1)</sup>,  
Р.И. Хайбуллин<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> КФУ, Казань, Россия

<sup>2)</sup> КФТИ КазНЦ РАН, Казань, Россия

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

С целью получения магнитного полупроводника на основе диоксида титана TiO<sub>2</sub> (рутила) были проведены эксперименты по имплантации 40 кэВ ионов V<sup>+</sup> в монокристаллические (100)- или (001)-ориентированные пластины TiO<sub>2</sub> с дозой  $1.5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Последовательно был проведен термический отжиг образцов в атмосфере воздуха при температурах 500 и 750 °С. Исследования микроструктуры и магнитных свойств образцов проводились методами спектроскопии Резерфордского обратного рассеяния (РОР) в случайной и каналированной геометриях, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и вибрационной магнитометрии.

Анализ результатов исследования показывает, что имплантированная примесь ванадия сосредоточена в поверхностном полностью аморфизованном слое рутила (~50 нм толщины) как в металлическом, так и в окисленном состояниях. Последующая термическая обработка приводит к восстановлению кристаллической структуры рутила, к диффузии примеси в объём кристалла для (001)-пластины TiO<sub>2</sub>. Большинство примеси ванадия найдено в междоузельных позициях решетки. Как имплантированные, так и последовательно отождённые образцы проявляют ферромагнитный отклик при комнатной температуре. Наблюдаемый магнетизм был соотнесен к парамагнитным V<sup>4+</sup> ионам, связанных в бесконечный ферромагнитный кластер косвенным обменным взаимодействием через кислородные вакансии.

Работа выполнена на оборудовании ФЦКП ФХИ КФУ Приволжского Федерального округа и смежных регионов, анализ методом РОР проводился в НИИЯФ МГУ на ускорительном комплексе AN 2500.

ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ZnO,  
ИМПЛАНТИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗОМ

А.И. Гумаров<sup>1)</sup>, Е.Н. Дулов<sup>1)</sup>, Л.Р. Тагиров<sup>1)</sup>, И.Ф. Гильмутдинов<sup>1)</sup>, Н.М. Лядов<sup>2)</sup>,  
В.В. Валеев<sup>2)</sup>, Р.И. Хайбуллин<sup>1,2)</sup>, А. Маскова<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> КФУ, Казань, Россия

<sup>2)</sup> КФТИ КазНЦ РАН, Казань, Россия

<sup>3)</sup> Nuclear Physics Institute of the AS CR, Rez, Czech Republic

Ионы  $\text{Fe}^+$  с энергией 40 кэВ и дозой  $1,5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> были имплантированы в пластинки ZnO при температуре 300 К или 900 К. Последующий отжиг образцов проводился в условиях высокого вакуума и кислорода воздуха. Полученные образцы исследовались методами резерфордского обратного рассеяния (РОР), мёссбауэровской спектроскопии на электронах конверсии (МСКЭ) и вибрационной магнитометрии (ВМ).

Данные РОР показали, что имплантация железа в ZnO при комнатной температуре подложки приводит к сильному радиационному повреждению кристаллической структуры. Методами ВМ и МСКЭ было выявлено, что доминирующей магнитной фазой являются наночастицы на основе  $\alpha$ -фазы металлического железа (доля примеси железа > 80%). Имплантация при высокой температуре подложки приводит к эффективному отжигу радиационных дефектов во время облучения. При этом, согласно МСКЭ данным, магнитные  $\text{Fe}^{2+,3+}$  ионы изоморфно замещают “домашние” катионы  $\text{Zn}^{2+}$  в кристаллической структуре ZnO. В спектрах МСКЭ наблюдается два секстета, с ранее неописанными параметрами сверхтонкой структуры, указывая на ферромагнитное состояние примеси. Температурный отжиг обоих типов образцов приводит к изменению их магнитных свойств, зависящих от температуры и среды отжига.

Работа выполнена на оборудовании Федерального центра коллективного пользования физико-химических исследований веществ и материалов Приволжского Федерального округа и смежных регионов (ФЦКП ФХИ).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ КАТОДА В СЛАБОТОЧНОМ ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ В СМЕСИ АРГОНА С ПАРАМИ РТУТИ

В.И. Кристя, Д.О. Савичкин, М.Р. Фишер  
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Смесь аргона с парами ртути используется в качестве рабочей среды в газоразрядных осветительных лампах. При протекании тока в такой смеси, кроме прямой ионизации атомов газов электронами, происходит также ионизация атомов ртути при столкновениях с метастабильными возбужденными атомами аргона (реакция Пеннинга). Это оказывает влияние на напряжение зажигания разряда в лампе, которое зависит не только от эмиссионных свойств электродов, но и от температуры газа, поскольку концентрация насыщенных паров ртути существенно возрастает с ее увеличением. В результате поток ионов ртути на катод быстро увеличивается с возрастанием температуры вследствие увеличения их концентрации. Однако влияние этих факторов на параметры разряда и на характеристики потоков ионов аргона и ртути, бомбардирующих поверхность катода, изучено недостаточно.

В данной работе проведено моделирование кинетики электронов, ионов и метастабильных возбужденных атомов в слаботочном разряде в смеси аргона-ртути между плоскими электродами и исследовано влияние температуры на концентрации и потоки частиц. Рассчитаны энергетические спектры потоков ионов обоих компонент смеси, а также их вклады в распыление катода как функция температуры смеси.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания «Организация проведения научных исследований» Минобрнауки РФ в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калужской области (проект № 14-42-03057).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ СВОБОДНЫХ ЭКСИТОНОВ В НИТРИДЕ ГАЛЛИЯ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМ МЕТОДОМ

А.Н. Поляков<sup>1)</sup>, М.А. Степович<sup>1),2)</sup>, Д.В. Туртин<sup>2)</sup><sup>1)</sup> Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, г. Калуга, Россия<sup>2)</sup> Ивановский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова, г. Иваново, Россия

Описана методика определения коэффициента диффузии и подвижности экситонов в полупроводниковых материалах и структурах при помощи низкотемпературных катодолюминесцентных (КЛ) времяпролётных исследований. Для экспериментальных измерений предлагается использовать полупроводниковые образцы, покрытые непроницаемой для КЛ излучения маской, имеющей круглые отверстия различного диаметра (порядка диффузионной длины экситонов). Такие образцы могут быть получены, если перед нанесением маски на их поверхность поместить полистереновые шарики различного диаметра (от десятых долей до единиц микрометра), которые удаляются после напыления маски. Представлены результаты анализа экспериментальных данных для монокристаллического нитрида галлия. Для анализа экспериментальных данных применялся метод конфлюэнтного анализа применительно к собственной модели КЛ экситонов, основанная на аналитическом решении трёхмерного уравнения диффузии экситонов и его аналитическом интегрировании. Методика может быть использована для получения информации о механизмах рассеяния, действующих в исследуемом образце, которую затруднительно или невозможно получить при традиционных электрических исследованиях.

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Калужской области (проект № 14-42-03062).

О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА, ГЕНЕРИРОВАННЫХ  
ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ МАТЕРИАЛЕ

Е.В. Серегина<sup>1)</sup>, М.А. Степович<sup>2),3)</sup>, А.М. Макаренков<sup>1)</sup>, М.Н. Филиппов<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Калужский филиал Московского государственного технического университета  
им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, Россия

<sup>2)</sup> Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, г. Калуга,  
Россия

<sup>3)</sup> Ивановский филиал Российского экономического университета  
им. Г.В. Плеханова, г. Иваново, Россия

<sup>4)</sup> Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, г. Москва,  
Россия

Количественная информация об объекте исследования может быть получена из сравнения данных эксперимента с результатами вычислений, проведенных с использованием математической модели, описывающей рассматриваемое физическое явление. В настоящей работе изложены результаты оценки использования различных подходов к моделированию распределения неосновных носителей заряда (ННЗ), генерированных широким электронным пучком, в результате диффузии ННЗ в однородном полупроводниковом материале, а также различные схемы организации вычислений искомых распределений. При проведении расчетов полагалось, что локальные значения параметров полупроводниковых мишеней имеют случайный разброс относительно своих усредненных по объему значений и проведена оценка влияния такого разброса на распределение ННЗ в полупроводнике.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания (проект № 1416), а также Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Калужской области (проект № 14-42-03062) и РФФИ и правительства Ивановской области (проект № 15-48-03210).

## КОРРЕКТИРУЮЩИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ МЕТОДИКИ «STRAIGHT LINE APPROXIMATION» В РЕНТГЕНОВСКОЙ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

В.П. Афанасьев, П.С. Капля

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ», Москва, Россия

Наиболее развитый и востребованный метод Рентгеновской Фотоэлектронной Спектроскопии (РФЭС), так называемый Peak Shape Analysis, основан на теории полностью исключаяющей процессы упругого рассеяния или методике «Straight Line Approximation». Сечения упругого и неупругого рассеяния примерно равны. Учет процесса упругого рассеяния приводит к эффектам: влиянию на сигнал РФЭС отражения от «подстилающей поверхности» и эффекту поворота «тела яркости». Строятся различные методики, позволяющие учесть эти эффекты /1/. Наиболее часто фотоэмиссия вызывается неполяризованным рентгеновским излучением, и сечение определяется двумя параметрами: сечением электронной фотоэмиссии  $\sigma_{\gamma \rightarrow e}$  и параметром асимметрии  $\beta$ . Вводят две поправки:  $Q_{eff}$  корректирующая  $\sigma_{\gamma \rightarrow e}$  и  $\beta_{eff}$ , учитывающая влияние эффекта поворота «тела яркости». Данный подход неприменим в ситуациях, когда рентгеновское возбуждение выполняется поляризованным излучением, либо когда, уточняя дипольное приближение, вводят дополнительные параметры определяющие сечение фотоэмиссии /2/.

Корректирующие поправки определяются коэффициентами разложения сечения упругого рассеяния в ряд по полиномам Лежандра и величиной альбедо для однократного рассеяния. Величина эквивалентная  $Q_{eff}$  определяется на основе сравнения малоуглового приближения с точным численным решением. В отличие от корректирующих параметров, представленных в работе и данных NIST /1/ и справедливых только для полубесконечных мишеней, результаты, представленные в настоящей работе, справедливы и для мишеней конечной толщины.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Powell C.J., Jablonsky A. // J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom., 2010, V. 178–179, P. 331.
2. Trzhaskovskaya M., Nefedov V., Yarzhemsky Y. // At. Data Nucl. Data Tables. 2001. V. 77 (1). P. 97.

МАЛОУГЛОВОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ И ТОЧНОЕ ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ  
ФУНКЦИИ ПРОПУСКАНИЯ

В.П. Афанасьев, П.С. Капля  
Национальный Исследовательский Университет «МЭИ», Москва, Россия

Решение задачи описания угловых и энергетических распределений электронов и легких ионов при прохождении сквозь слои твердого тела – самостоятельная задача, необходимая для описания спектров частиц, рассеянных слоисто неоднородными мишенями.

В настоящей работе описание функции пропускания /1-2/ строится на основе решения граничной задачи для уравнения переноса методом инвариантного погружения /1-2/. Функция пропускания, записанная в малоугловом приближении, отождествляется с решением Гаудсмита–Саундерсена /3/. Но решение, представленное в работе /3/, получено для безграничной среды, и не учитывает граничные условия. Анализ решения, полученного в малоугловом приближении, указывает на оригинальный учет фактора обратного рассеяния.

Строится методика точного численного решения уравнений Чандрасекара для функции пропускания /1/. Указывается на необходимость решения системы уравнений, включающей как уравнения для функции пропускания, так и для функции отражения от слоя. Полученная система дифференциальных матричных уравнений типа Риккати и Ляпунова численно решается на основе метода Backward Differential Formula (BDF) /4/.

Сопоставление расчетов, выполненных в малоугловом приближении, с результатами точных численных расчетов позволяют определить влияние на величину погрешности различных факторов: сечений упругого рассеяния, величины альбедо для однократного рассеяния.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии. М.: ИЛ. 1953. с. 462.
2. Соболев В.В. Рассеяние света в атмосферах планет. М.: Наука. 1972, с. 336.
3. Goudsmit S., Saunderson J.L. // Phys. Rev. 1940; V.58, p.36.
4. Peinado J., Ibañez J., Hernández V., Arias E. // Procedia Comput. Sci. 2010, V. 1, P. 2569.

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ НЕУПРУГОГО РАССЕЙЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО СПЕКТРАМ РФЭС И ХПЭ

В.П. Афанасьев, А.С. Грязев, П.С. Капля, Н.В. Ляпунов  
Национальный Исследовательский Университет «МЭИ», Москва, Россия

Одной из главных проблем количественной электронной спектроскопии является отсутствие надежных данных по дифференциальным сечениям неупругих потерь энергии. Подобная проблема также возникает в задачах отыскания энергетических спектров легких ионов. Квантово-механические нелокальные потери энергии или потери на возбуждение ленгмюровских колебаний описываются в рамках классической диэлектрической теории /1/. Последовательные квантово-механические теории нелокальных потерь энергии в твердых телах дают возможность описания простейших моделей, не отражающих всего многообразия явления /1/.

Сегодня для восстановления дифференциальных сечений неупругого рассеяния используются спектры Характеристических Потерь Энергии (ХПЭ) /2/. С математической точки зрения определение дифференциальных сечений однократного неупругого рассеяния  $x_{in}(\Delta)$  из данных ХПЭ относится к классу некорректных задач /3/. Данную задачу усложняет наличие приповерхностной области, в которой сечение  $x_{inS}(\Delta)$  отличается от сечения в удаленном от поверхности однородном массиве мишени  $x_{inB}(\Delta)$ .

Рентгеновская Фотоэлектронная Спектроскопия (РФЭС) является сегодня наиболее популярным методом анализа поверхностей твердых тел. Имеются подробные энциклопедии (Handbooks), в которых приведены данные по многим элементам таблицы Менделеева и их соединениям. По данным NIST, число установок, в которых реализован РФЭС метод, в сотни раз превышает число приборов измеряющих ХПЭ спектры. Указанные обстоятельства остро ставят задачу построения методики восстановления сечений  $x_{inS}(\Delta)$  и  $x_{inB}(\Delta)$  из РФЭС спектров. Реализации данной методики и анализу возможностей восстановления сечений посвящена настоящая работа.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Векленко Б.А., Афанасьев В.П., Лубенченко А.В.// ЖЭТФ, 2014, Т. 145, стр. 601-614.
2. Tougaard S., Chorkendorff I. // Phys. Rev. B, 1987, V. 35, P. 6570.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. Москва, Наука, 1979, с. 288.

О ЗНАЧЕНИЯХ ПОКАЗАТЕЛЯ СТЕПЕНИ  
В ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА РАСПЫЛЕНИЯ ОТ ЭНЕРГИИ СВЯЗИ  
ПРИ ЭМИССИИ АТОМОВ С ГРАНИ (001) Ni

А.И. Мусин, В.Н. Самойлов  
Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

В рамках моделей распыления аморфных мишеней использование функции распределения  $\cos\theta_0/E_0^{2-2m}$  для атомов, пересекающих поверхность, приводит к зависимости коэффициента распыления от энергии связи  $S \propto 1/E_b^{1-2m}$ . В ряде наших работ было показано, что рассеяние эмитированных атомов на стадии вылета приводит к сдвигу значения параметра  $m_{\text{eff}}$  в зависимости коэффициента распыления от энергии связи  $S \propto 1/E_b^{1-2m_{\text{eff}}}$  в сторону отрицательных значений при  $m = 0$  (см., например, /1/). Сильный сдвиг  $m_{\text{eff}}$  в сторону отрицательных значений был обнаружен также в /2/ при обработке экспериментов по распылению поликристаллических мишеней ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией 1 и 10 кэВ. В настоящей работе рассчитаны значения  $m_{\text{eff}}$  при  $m = 0$  для эмиссии атомов с грани (001) Ni. Применен метод расчета, использованный в /1, 2/. Для всех распыленных, “собственных” по азимутальному углу, фокусированных и перефокусированных атомов получены значения  $m_{\text{eff}} = -0.073$  (-0.086), 0.073 (0.055), -0.167 (-0.155) и -0.631 (-0.452) соответственно. Расчеты проведены по моделям 5 атомов (21 атома). Для перефокусированных и фокусированных атомов происходит значительный сдвиг значения  $m_{\text{eff}}$  в сторону отрицательных значений при  $m = 0$ . Для “собственных” по азимутальному углу атомов сдвиг величины  $m_{\text{eff}}$  происходит в другую сторону.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Самойлов В.Н., Гурко И.Б. и др. // В сб. Материалы 16-й Международной конф. “Взаимодействие ионов с поверхностью”, 25-29 августа 2003, Москва, т. 1, с. 178-179.
2. Shulga V.I. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 2002, V. 195, № 3-4, p. 291-301.

## О НАБЛЮДАЕМОСТИ ПЕРЕФОКУСИРОВАННЫХ РАСПЫЛЕННЫХ АТОМОВ ПРИ ЭМИССИИ С ПОВЕРХНОСТИ ГРАНИ (001) Ni

В.Н. Самойлов, А.И. Мусин  
Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

Для несимметричных относительно направления  $\langle 100 \rangle$  интервалов азимутального угла  $\varphi$  формирование сигнала распыленных атомов при эмиссии атомов с поверхности происходит за счет “собственных” атомов, начальный угол вылета которых  $\varphi_0$  принадлежит интервалу углов  $\varphi$ , и фокусировки “несобственных” атомов: фокусированных атомов, рассеянных на ближайшем атоме линзы, и перефокусированных атомов, рассеянных на дальнем атоме линзы. Эффект перефокусировки был обнаружен в [1] и исследован в ряде работ, например, в [2]. В настоящей работе изучался вопрос о выделении перефокусированных атомов в общем сигнале эмитированных атомов. Оказалось, что в распределениях с одновременным разрешением по энергии и полярному углу для фиксированных интервалов углов  $\varphi$  отчетливо различаются отдельные “хребты” – максимумы распределений для перефокусированных, фокусированных и “собственных” атомов. Максимум распределения перефокусированных атомов наблюдается в области энергии и полярных углов, при которых нет вылета других групп атомов. Таким образом, в экспериментах оказывается принципиально возможным выделить отдельно только перефокусированные атомы. При этом второй, высокоэнергетический максимум в дифференциальном по обоим углам распределении эмитированных атомов по энергии образуется фокусированными или “собственными”, а не перефокусированными атомами.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Корсакова О.С., Алешкевич В.А., Самойлов В.Н., Никитин А.М. // Поверхность, 1997, № 2, с. 77-92.
2. Самойлов В.Н., Носов Н.В. // Поверхность, 2014, № 3, с. 81-92.

УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОТРАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ  
СКОЛЬЗЯЩЕМ ПАДЕНИИ  
НА ПОВЕРХНОСТЬ МИШЕНИ

А.И. Толмачев  
Российский новый университет, Москва, Россия

Исследование явления отражения заряженных частиц от твердых тел дает возможность получать информацию о свойствах поверхностных слоев вещества, анализировать состав и структуру материалов, что имеет многочисленные практические применения /1/. При углах падения частиц, близких к нормали, отражение частиц может быть успешно рассчитано методами компьютерного моделирования /2/. Однако при скользких углах падения статистика компьютерных вычислений оказывается недостаточной для получения точной информации об угловом распределении отраженных частиц, и требуется теоретическое решение задачи, например, в диффузионном приближении /3/. В настоящей работе задача решается в более общем виде, на основании интегродифференциального уравнения. В качестве сечения рассеяния берется сечение для усеченного кулоновского потенциала. Такое сечение может быть представлено в аналитическом виде и с ростом энергии меняется от изотропного сечения до резерфордского. Полученные результаты сравниваются с данными компьютерного моделирования и экспериментом.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Борисов А. М., Машкова Е. С.. Физические основы ионно-лучевых технологий. М.: Университетская книга, 2011. 142 с.
2. Ziegler J. F., Ziegler M. D., Biersack J. P. The Stopping and Range of Ions in Matter. Version SRIM – 2008.04.
3. Толмачев А. И. // Поверхность, 2012, вып. 3, с. 76.

## СВОЙСТВА ХРОМОНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПУЧКА ИОНОВ УГЛЕРОДА

Э.З. Хамдохов<sup>1</sup>, Р.Ш. Тешев<sup>1</sup>, З.М. Хамдохов<sup>1</sup>,

В.С. Калажоков<sup>1</sup>, Х.Х. Калажоков<sup>1</sup>

В.С. Куликаускас<sup>2</sup>, А.А. Ерискин<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>КБГУ, Нальчик, Россия

<sup>2</sup> НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,

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

<sup>3</sup> МИЭМ НИУ «ВШЭ», Москва, Россия, <sup>4</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Твердые сплавы на основе карбида хрома, обладающие высокой твердостью и коррозионной стойкостью, широко используются для изготовления износостойких деталей. Для образования твердого сплава прочные и хрупкие зерна карбидов хрома связываются подходящим металлом (никелем), который является нейтральным по отношению к углероду, т.е. не образует карбиды.

В работе исследованы особенности фазовых превращений в пленках состава Cr–Ni, возникающих после воздействия пучка ионов углерода. Нихромовая пленка субмикронной толщины наносилась методом термического испарения навески X20N80 (80% Ni, 20% Cr) в вакууме на кремниевую подложку, покрытую тонкими барьерными слоями SiO<sub>2</sub> (600 нм) и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (120 нм). После этого без напуска воздуха в вакуумную камеру на поверхность полученной пленки нихрома методом электродугового распыления графитового катода в магнитном поле осаждалась пленка углерода. Исследование методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии показало образование в хромоникелевом сплаве соединения карбида хрома Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> после воздействия углеродным пучком.

Полученные данные позволяют предположить следующее. В процессе бомбардировки ионами углерода пленки состава Cr–Ni, нагреваемую дугой, происходит активация атомов хрома к процессам химического взаимодействия с внедренными в пленку атомами углерода, обладающими высокой реакционной способностью, до тех пор, пока не образуется структура Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>–Ni.

## КВАНТОВОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЧАСТИЦ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ ПОВЕРХНОСТИ

П.А. Борисовский, С.В. Гаврилов, Е.Н. Моос, О.В. Савушкин  
Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,  
Ул. Свободы 46, Рязань, Россия

Распыление поверхностей ионами важный процесс для ряда прикладных задач технологии и диагностики. Обсудим энергетическую дисперсию вторичных частиц в рамках теории возмущения. Бомбардирующий ион массой  $M_1$  представим волновой функцией  $\psi_{in}$  и соответствующей энергией  $E_{in}$

$$\psi_{in} = C_{in} e^{\frac{i}{\hbar} E_{in} t} e^{-\frac{i}{\hbar} (\pi_x x + \pi_y y)}, \quad E_{in} = \frac{\pi_x^2 + \pi_y^2}{2M_1}$$

Выбивание иона массой  $M_2$  из поверхности сопровождается обменом импульсами. Пусть выбитый ион движется от подложки с импульсом  $\vec{p}_0 = (p_{0x}, p_{0y})$  (в общем случае  $p_0 \leq \pi$ ), а область обмена по нормали к поверхности  $y_c$ . С позиции классической механики при парных взаимодействиях ион поверхности приобретает энергию в диапазоне от нуля до некоторой величины  $E_0$ . Сопоставим выбитой атомной частице волновую функцию  $\psi_0$  и энергию:

$$\psi_0 = C_0 e^{\frac{i}{\hbar} E_0 t} e^{-\frac{i}{\hbar} (p_x x + p_y y)},$$

$$E_0 = \frac{p_{0x}^2 + p_{0y}^2}{2M_2},$$

определив  $\psi_0$  как центральную упруго рассеянную волну.

В области обмена на центральную упруго рассеянную компоненту действует нестационарное возмущение с гамильтонианом  $W(t, x, y)$ . В связи с этим волновая функция выбитых частиц представима суперпозицией центральной упруго рассеянной и возмущенных волн

## ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ АТОМОВ В ПОТОКЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

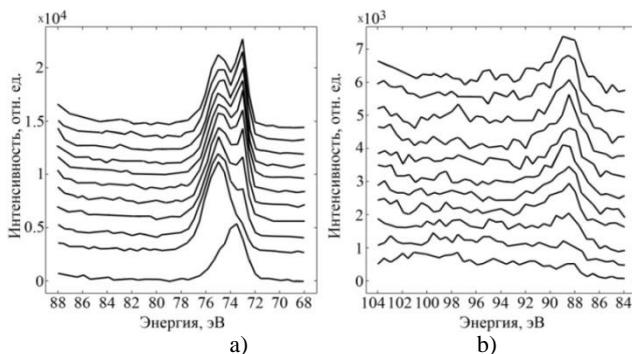
П.А. Борисовский<sup>1)</sup>, Г.В. Киселев<sup>1)</sup>, А.В. Наумкин<sup>2)</sup>,  
Е.Н. Моос<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> РГУ имени С.А. Есенина, Рязань, Россия

<sup>2)</sup> Институт элементоорганических соединений  
им. А.Н. Несмеянова РАН, Москва, Россия

Воздействие потоков частиц высокой энергии изменяет состояние поверхности и требует корректировки технологических режимов /1-3/.

Приведены результаты исследования воздействия ионов на состояние атомов верхнего слоя катодов He-Ne лазеров методами электронного микронзонда, рентгеновской фотоэлектронной и Оже-спектроскопии. Изучалась также поверхность зеркал активных элементов лазеров на сроке службы.



Вид спектров: а) алюминия и б) магния Al/Mg катода

Спектры соответствуют  $Al_2O_3$  с появлением линий свободных атомов Al, интенсивность которых увеличивается (верхние спектры). Атомы Mg при этом образуют окислы (Mg 2s в окислах соответствует энергии 88.5 эВ в спектре).

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.S., Virgiliev Yu.S., //Journal of Spacecraft and Rockets, 2011, Vol. 48, № 1. P. 45.
2. Ерошкин М.В., Киселев Г.В., Моос Е.Н., //Изв. РАН. Сер. физ., 2014, Т. 78, № 6. С. 686.
3. Авилкина В.С., Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Машкова Е.С., //Изв. РАН. Сер. физ., 2012, Т. 76, № 5. С. 586.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ БОМБАРДИРУЮЩИХ ИОНОВ ДЛЯ ВИМС

С.Н. Морозов, У.Х.Расулев

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан, e-mail: [morozov@aic.uz](mailto:morozov@aic.uz)

Взаимодействие многозарядных ионов (МЗИ) с твердым телом сопряжено с выделением потенциальной энергии нейтрализации, которая вкладывается в электронную подсистему тонкого поверхностного слоя. Применение медленных МЗИ для ВИМС открывает возможности повышения степени ионизации распыленных частиц /1/.

В работе обобщаются результаты исследований особенностей спектров вторичной ионной эмиссии при бомбардировке ряда мишеней (Si, Ag, C, Bi, GaAs) МЗИ  $Bi^{q+}$ ,  $Cs^{q+}$ ,  $Si^{q+}$ ,  $Sb^{q+}$  ( $q=1-7$ ) в диапазоне энергий 1– 10 кэВ.

Исследована зависимость выхода различных типов атомарных и кластерных ионов матрицы, а также выхода адсорбированных ионов и ионов примесей от заряда и энергии бомбардирующих МЗИ. Наблюдается рост относительного выхода различных вторичных ионов до десятков раз с ростом заряда МЗИ от 1 до 5,7. Характерно, что наибольший прирост выхода достигается при уменьшении кинетической энергии МЗИ, а также при увеличении потенциалов ионизации вторичных частиц. Наиболее вероятный механизм повышения выхода вторичных ионов связан с ростом степени ионизации распыленных частиц в результате электронного обмена с бомбардирующим МЗИ в процессе прямого выбивания. Обсуждаются возможности усовершенствования ВИМС при использовании медленных МЗИ с  $q = 5,7$ .

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Morozov S.N. // ISSN 1027\_4510, Journal of Surface Investigation. X\_ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2012, Vol. 6, No. 4, p. 660.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КЛАСТЕРА $\text{Cu}_3$ НА ПОВЕРХНОСТИ $\text{Cu}(100)$ СО СТУПЕНЬЮ

Е.В. Дуда, Г.В. Корнич

Запорожский национальный технический университет,  
Запорожье, Украина

Исследовались релаксация и термическая диффузия кластера  $\text{Cu}_3$ , упавшего на поверхность  $\text{Cu}(100)$  вблизи ступени, толщиной один атомный слой, а также динамика атомных переходов, не приводящих к диффузии кластера, во временных интервалах до 1 мкс. Моделирование выполнялось методом температурно-ускоренной молекулярной динамики [1], энергии атомных переходов определялись методом NEB [2].

Кластер налетал на мишень нормально ее поверхности с энергией 0.6 – 3 эВ. Различные случаи равновесной температуры подложки моделировались в интервале 500 – 700 К. Расстояние от кластера до ступени определялось, как показано на рис. 1.

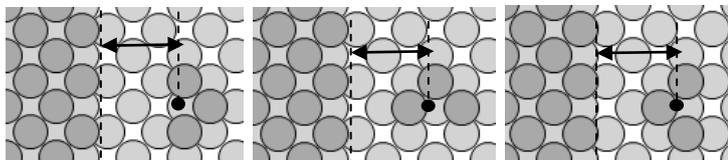


Рис. 1. Определение расстояния между кластером и ступенью.

Кластер перемещается из одного положения в другое в результате термически активированных перескоков одного из его атомов, что геометрически эквивалентно повороту кластера на  $90^\circ$ . Показано, что частота элементарных актов поворотов кластера меняется скачкообразно при изменении расстояния от кластера до ступени на одну постоянную решетки в пределах расстояний 1 – 3 постоянной решетки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. M. R. Sorensen, A. F. Voter // Journal of Chemical Physics, 2000, 112, №21, 9599.
2. G. Henkelman, H. Jonsson // Journal of Chemical Physics, 2000, 113, №22, 9978.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КЛАСТЕРОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНА  
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ

А.А. Ермоленко<sup>1)</sup>, Г.В. Корнич<sup>1)</sup>, С.Г. Буга<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup> ФГБНУ "Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных мате-  
риалов", г. Москва, г. Троицк, Россия

С помощью метода классической молекулярной динамики выполнено моделирование взаимодействия низкоэнергетических ионов аргона и ксенона с предварительно осаждёнными на поверхность кристалла полиэтилена кластерами меди и золота.

В качестве потенциалов взаимодействия были выбраны многочастичный потенциал AIREBO /1/ для описания ковалентных связей и межмолекулярных взаимодействий в полиэтилене, многочастичный потенциал /2/ для описания взаимодействия между атомами металлов, потенциал Леннард-Джонса для описания взаимодействий атомов металла с атомами подложки и потенциал Зиглера-Бирзака-Литтмарка для описания взаимодействия бомбардирующих ионов с атомами кластера и подложки. Начальные координаты бомбардирующего иона для каждого из одиночных актов бомбардировки генерировались с помощью двумерной псевдослучайной последовательности.

Выполнен сравнительный анализ выхода расплывённых атомов и соединений, коэффициентов распыления и обратного рассеяния. Исследовано изменение структуры кластеров и подложки в процессе распыления.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. S.J. Stuart, A.B. Tutein and J.A. Harrison // Journal of Chemical Physics, 2000, V. 112, P. 6472.
2. G. Ackland, V. Vitek // Physical Review B, 1990, V. 41, № 15, P. 10324.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПЫЛЕНИЯ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КЛАСТЕРОВ НА ПОВЕРХНОСТИ (0001) ГРАФИТА

Г.В. Корнич

Запорожский национальный технический университет,  
Запорожье, Украина

Развитие методов целенаправленной модификации гетерогенных поверхностей энергетическими частицами представляет значительный интерес для современного машиностроения, электронных и биохимических технологий. В работе обсуждаются и обобщаются результаты моделирования эволюции атомных кластеров меди размером 13-195 атомов на поверхности (0001) графита под действием низкоэнергетической бомбардировки ионами Ag, Xe, Cu, Cu<sub>2</sub> в рамках метода классической молекулярной динамики /1,2/. Энергия бомбардирующих частиц, падающих нормально относительно подложки, изменялась в диапазоне от 50 эВ до 400 эВ. Эволюция системы “атомный кластер / подложка - бомбардирующий ион” моделировалась в течении 6 пс. Для каждого случая начальной энергии и размера кластера было выполнено по 5000 испытаний, отличающихся начальными координатами налетающего на кластер иона. Обсуждается роль подложки, как стока энергии, получаемой кластером от налетающего иона, синергизм /3/ при распылении кластера димерами Cu<sub>2</sub>, а так же особенности полярных и азимутальных угловых распределений распыленных и рассеянных частиц.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Eckstein W. Computer Simulation of Ion-Solid Interactions, Berlin, Springer Verlag, 1991, 320.
2. Kornich G.V., Betz G., Zaporozhchenko V., Pugina K.V. // Surface Science, 2007, 601, 209.
3. Kornich G.V., Betz G., Kornich V.G., Shulga V.I., Yermolenko O.A.// Nucl. Instr. and Meth., В 2011, 269, 1600.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КЛАСТЕРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БОМБАРДИРОВКИ ИОНАМИ Ag

Д.В. Широкопад, Г.В. Корнич  
Запорожский национальный технический университет,  
Запорожье, Украина

Направленная модификация многокомпонентных металлических наносистем под действием энергетических бомбардирующих частиц представляет значительный интерес для машиностроения, электронных и биохимических технологий. В работе исследована эволюция биметаллических атомных кластеров под действием низкоэнергетической бомбардировки ионами Ag в рамках метода классической молекулярной динамики. В качестве мишени использовались кластеры Ni-Al и Cu-Au, состоящие из 78 и 390 атомов. Энергия бомбардирующих частиц изменялась в диапазоне от 1 эВ до 800 эВ. Эволюция системы "атомный кластер - бомбардирующий ион" моделировалась в течении 5 пс. Для каждой начальной энергии было выполнено по 500 испытаний, отличающихся начальными координатами и направлением движения налетающего на кластер иона Ag. Межатомное взаимодействие атомов металлов описывалось многочастичным потенциалом Акланда [1].

В процессе моделирования получены изменения потенциальной энергии, температурные зависимости, характеристики распыления кластеров, перемещения атомов через границу раздела монометаллических частей кластеров. Получены так же максимальные температуры разогрева кластеров, сравниваются соответствующие свойства кластеров и объемных веществ при ионной бомбардировке, рассмотрены механизмы передачи энергии от налетающего иона различным кластерам.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ackland G. J., Vitek V. // Physical Review B, 1990, 41, 15, 10324-10333.

THE FORMATION OF SODIUM NANOPARTICLES IN SODIUM-SILICATE  
GLASSES UNDER THE ACTION OF ELECTRON BEAM AND THERMAL  
TREATMENTS

E.S. Bochkareva<sup>1</sup>, N.V. Nikonorov<sup>1</sup>, O.A. Podsvirov<sup>2</sup>,  
M.A. Prosnikov<sup>3</sup>, A.I. Sidorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) ITMO University, Kronverksky ave., 49, 197101, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup>) St.Petersburg Polytechnical University, Polytechnicheskaya str., 29, 195251, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup>) Ioffe Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, Polytechnicheskaya str., 26, 194021, St. Petersburg, Russian Federation

It is shown experimentally that the processing the sodium-containing silicate glasses with the electron beam with electron energy 35 keV and doses 20-65 mC/cm<sup>2</sup> and the subsequent thermal treatment above the glass transition temperature result in the formation of the sodium nanoparticles under the glass surface that manifest themselves in the plasmon resonance absorption band in the 405-410 nm spectral region. The main mechanisms of this effect are the field migration of the positive sodium ions into the negatively charged region under the glass surface, produced by the thermalized electrons, reduction of sodium ions by the thermalized electrons, and the nanoparticles growth as a result of thermal diffusion of the sodium atoms during the thermal treatment. The results are compared with the described in [1]. In that work the silver nanoparticles were synthesized in the silver-containing glasses by the same method and in the same conditions. The computer simulations in the dipole quasi-static approximation have shown that the most realistic model of the nanoparticle structure is the solid or liquid sodium core with two shells, – the inner shell consisting of sodium oxide and the external one being vacuum or gas.

R E F E R E N C E

1. O. A. Podsvirov, A. I. Sidorov, V. A. Tsekhomskii, A. V. Vostokov // Phys. Sol. St. 2010, V. 52, P. 1906.

## ИЗМЕНЕНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МАГНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ИОНОВ ВОДОРОДА И УГЛЕРОДА

Г. В. Потемкин<sup>1)</sup>, А. Е. Лигачев<sup>2)</sup>, М. В. Жидков<sup>3),4)</sup>, Ю. Р. Колобов<sup>3),4)</sup>, Г. Е. Ремнев<sup>1)</sup>, М. Ю. Смолякова<sup>3)</sup>, С. А. Божко<sup>3),4)</sup>

<sup>1)</sup>ТПУ, Томск, Россия

<sup>2)</sup>ИОФ имени А. Н. Прохорова РАН Москва, Россия,

<sup>3)</sup>БГНИУ, Белгород, Россия

<sup>4)</sup>ИСМ и ПМ РАН, Черногловка, Россия

Изучение структурно-фазовых превращений в металлах и сплавах под действием мощных пучков заряженных частиц проводится уже длительное время, однако, несмотря на обилие экспериментальных данных однозначных соотношений о связи параметров пучка ионов с результатами воздействия на материалы не получено. Формирование поверхностного рельефа под действием мощных ионных пучков также является вопросом, на который нет однозначного ответа. В общем случае этот процесс зависит от свойств потока частиц, характеристик материала и условий обработки. Особенно это касается таких легкоплавких металлов, как алюминий и магний. В связи с этим, исследование взаимодействия мощных ионных пучков с их поверхностью представляет научный и практический интерес. Облучение проводили на ускорителе «ТЕМП-4М» (вакуумный диод с магнитной изоляцией), работающем в двух-импульсном режиме (энергия однозарядных ионов углерода  $E = 250$  кэВ, длительность  $t = 100$  нс). Несепарируемый поток ионов представляет собой смесь  $Sp+i$  (в основном  $C^+$ ) и нейтралов  $Sp$ .

Средний размер микрократеров на поверхности магния после её обработки мощным ионным пучком при энергии 250 кэВ и длительности импульса – 100 нс остается неизменным и не отличается существенно от кратеров, полученных имплантации ионов аргона. С ростом плотности мощности МИП концентрация кратеров возрастает. Под действием мощных ионных пучков на поверхности магния формируются микрочастицы и гребневая структура.

## ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛОКОН УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ВЫСОКОДОЗНОЙ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ

Н.Н. Андрианова<sup>1)</sup>, А.М. Борисов<sup>1)</sup>, Ю.С. Виргильев<sup>2)</sup>,  
Е.С. Машкова<sup>3)</sup>, В.И. Шульга<sup>3)</sup>

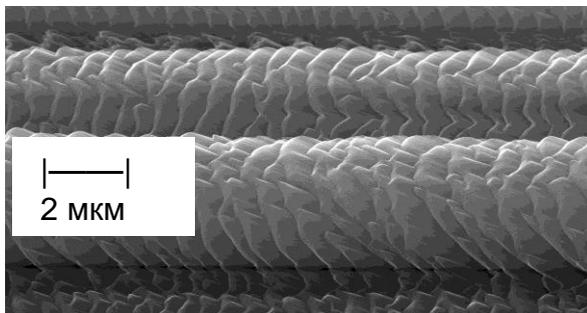
<sup>1)</sup>МАТИ-РГТУ имени К.Э. Циолковского, Москва, Россия

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

<sup>3)</sup>НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Исследования модификации полиакрилнитрильных (ПАН) углеродных волокон показали, что при нормальном падении ионов и температурах, больших температуры отжига радиационных нарушений и превышении порога по энергии ионов, происходит гофрирование поверхности волокна, при этом ребра гофров перпендикулярны оси волокна /1/. При наклонном падении форма гофров изменяется, а угол между направлениями ребер гофров и осью волокна соответствует направлению ионного пучка, см. рис.1.

Рис.1. РЭМ-изображение волокон композита КУП-ВМ после облучения ионами



$N_2^+$  с энергией 30 кэВ при  $T=400^\circ\text{C}$  и угле падения  $40^\circ$ .

С использованием программы /2/ проведено компьютерное моделирование распыления системы ПАН волокон при различных углах падения ионов. Обсуждается аналогия картины ионно-лучевой эрозии поверхности волокон с развитием квазипериодического рельефа, типичного для механизма неустойчивости Бредли-Харпера.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Петров Д.В. // Поверхность. 2014. № 6. с.6.
2. Shulga V.I. // Nucl. Instrum. Methods Phys Res. B. 2014. V. 338. P.8.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВЫХ НАНОКЛАСТЕРОВ НА ПРИМЕРЕ КСЕНОНА

Б. Батгэрэл, А.Ю. Дидык, В.В. Ленивенко, Э.Г. Никонов, О.К. Никонова, И.В.  
Пузынин, Т.П. Пузынина  
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Целью данной работы является исследование процессов формирования газовых нанокластеров Хе. В работе исследовано влияние различных температурных режимов на процесс образования и эволюции нанокластеров.

Молекулярно-динамическое (МД) моделирование основано на представлении объектов моделирования в виде системы взаимодействующих частиц (атомов или молекул). Эволюция системы происходит в результате движения упомянутых выше частиц. Координаты частиц в каждый последующий момент времени вычисляются посредством интегрирования уравнений движения, в которые входят потенциалы взаимодействия частиц между собой и внешней средой. Для моделирования использовалась следующая конфигурация. В начальный момент времени  $t=0$  молекулы Хе (1415) равномерно размещались в кубе с геометрическими размерами, зависящими от расстояния между атомами. Расчеты производились для различных значений скорости охлаждения и различных начальных плотностей ксенона с использованием пакета программ LPMO[1-3]. В результате МД моделирования была установлена зависимость массовых распределений, образующихся нанокластеров, от выбора режима эволюции системы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. S. Davis, C. Loyola, F. Gonzalez, J. Peralta, // JPCP 181(2010) 2126-2139.
2. B. Batgerel, E.G. Nikonov, I.V. Puzynin // Bulletin of PFUR. No 1, 2014. pp. 47–51.
3. Б. Батгэрэл, Э. Г. Никонов, И. В. Пузынин, // Вестник РУДН. № 4. 2013. С. 42–56.

## ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЕВ InFeAs И ИХ МОДИФИКАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Ю.А. Данилов<sup>1,2)</sup>, Ю.А. Дудин<sup>2)</sup>, А.В. Кудрин<sup>1)</sup>,  
В.П. Лесников<sup>2)</sup>, Е.В. Петрякова<sup>1)</sup>, Е.А. Питиримова<sup>1)</sup>,  
Р.Р. Якубов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

<sup>2)</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт при ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия

Ферромагнитные полупроводники на основе  $A_3B_5$  обладают возможностями, недостижимыми в обычных материалах. Были исследованы слои InFeAs, нанесённые на подложки полуизолирующего GaAs ориентации (100) или (111) лазерным распылением нелегированного InAs и чистого Fe в вакууме. Температура нанесения варьировалась от 200 до 400°C, содержание Fe (YFe) изменялось от 0.04 до 0.25. Толщина слоев составляла  $\sim 25$  нм, скорость нанесения  $\sim 5$  нм/мин. Электронографические исследования на отражение свидетельствовали о монокристаллической структуре слоев InFeAs для всего диапазона температур осаждения. Сформированные слои облучались легкими ионами He<sup>+</sup> с энергией 40 кэВ, производящими точечные дефекты (в основном, вакансии и антиструктурные дефекты). Имплантация приводила к повышению концентрации электронов в слоях, особенно при дозе выше  $10^{14}$  см<sup>-2</sup>, и снижению их подвижности. В частности, для слоя InFeAs, выращенного при Tg = 300°C и YFe = 0.25, концентрация электронов увеличивалась почти в 3 раза до  $6.3 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> при дозе ионов  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>, а подвижность снижалась от 17 до 4 см<sup>2</sup>/В.с. Ферромагнитное поведение в слоях InFeAs, полученных лазерным методом, имеет, вероятно, кластерную (возможно, состава FeAs) природу. Атомы Fe, находящиеся в узлах индия, являются нейтральной примесью, а n-тип проводимости обусловлен собственными дефектами, присутствие которых связано с низкотемпературным процессом эпитаксии.

**Секция IV**

**МОДИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТИ**



ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В ПЛОТНОМ КСЕНОНЕ ПРИ ДАВЛЕНИИ 270 БАР,  
ОБЛУЧЕННОМ ТОРМОЗНЫМИ  
ГАММА-КВАНТАМИ С ПОРОГОВОЙ ЭНЕРГИЕЙ 10 МэВ

А.Ю.Дидык

Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций  
имени Г.Н.Флерова, Дубна, Россия

Естественный ксенон при начальном давлении 270 бар в камере высокого давления (КВДК) с двумя внутренними цилиндрическими камерами из Д16 и особо чистого алюминия был облучен в течение 43 часов тормозными  $\gamma$ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ на ускорителе электронов МТ-25 при средних интенсивностях пучка 20-22 мкА. Через 10 часов облучения давление упало до 185 бар и до окончания облучения не менялось. Давление ксенона при стационарном режиме облучения выросло до 230 бар.

После завершения облучения часть газа из КВДК была перепущена в отдельный баллон для измерения состава газа на газовом масс анализаторе. После вскрытия КВДК две внутренних камеры были установлены на германиевый прецизионный  $\gamma$ -детектор на 15 часов и  $\gamma$ -спектры были получены и расшифрованы. При визуальном осмотре внешней камеры из Д16 на входной заглушке и вблизи нее поверхность Д16 покрылась видимым налетом значительной толщины коричневатого-желтоватого цвета.

При разборке внутренней алюминиевого цилиндра из него высыпалось не менее 20-30 мелких черных частичек с размерами до 1 мм. Рентгеновский микрозондовый анализ (РМЗА) и РЭМ исследования позволили определить состав большинства синтезированных частиц и структурных объектов и покрытий необычного элементного состава. В отдельной статье будут обсуждены механизмы реакций, которые могли бы привести к обнаруженным аномалиям.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Didyk A.Yu., Wiśniewski R. Properties of Hydrogen and Its Isotopes under High Pressure and Technological Applications. Dubna, JINR, 2013, 320 p. Monograph. ISBN 978-5-9530-0358-2.
2. Didyk A.Yu., Wiśniewski R., Wilczynska-Kitowska. Europe Physics Letters (EPL), 2015, 109, 22001-P1-22001-P6.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ, ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА И СВОЙСТВ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ с Cr, Zn и In

И.И. Ташлыкова-Бушкевич<sup>1)</sup>, Ю.С. Яковенко<sup>2)</sup>,  
В.С. Куликаускас<sup>3)</sup>, В.Г. Шепелевич<sup>4)</sup>, И.С. Ташлыков<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> БГУИР, Минск, Беларусь,

<sup>2)</sup> БГПУ им. М. Танка, Минск, Беларусь,

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

<sup>4)</sup> БГУ, Минск, Беларусь

Быстрозатвердевшие (БЗ) сплавы находят широкое применение в современной технике как материалы с улучшенными физико-механическими свойствами. В силу большой доли производства алюминиевых изделий и интереса к влиянию микро- и макроструктуры на свойства поверхности БЗ сплавов изучение функциональных зависимостей и закономерностей между значениями шероховатости, смачиваемостью и композиционным составом поверхностей фольг и тонких пленок сплавов Al, получаемых высоко- и гиперскоростной кристаллизацией, представляют как практический, так и теоретический интерес. В настоящей работе исследованы микроструктура, топография, элементный состав и смачиваемость БЗ фольг алюминия высокой чистоты (99.98%) и его бинарных сплавов с Cr, Zn и In с применением методов АСМ, РОР, покоящейся капли. Установлены факторы, определяющие зависимость краевого угла смачивания поверхности материала от распределения и концентрации легирующих элементов в приповерхностных слоях и величин шероховатости. Исследовались также свойства тонких пленок Al и его сплавов с Cr и In, осажденных на стеклянную подложку в условиях ассистирования собственными ионами (метод ОПАСИ). Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о возможности управления смачиваемостью алюминиевых материалов путем модификации их поверхностей как методом центробежной закалки, так и методом ОПАСИ.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ  
СПЛАВОВ Al-Cr МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ  
СПЕКТРОСКОПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ

И.И. Ташлыкова-Бушкевич<sup>1)</sup>, М. Amati<sup>2)</sup>, Н. Sezen<sup>2)</sup>,  
В.Г. Шепелевич<sup>3)</sup>, Gregoratti L.<sup>2)</sup>, Kiskinova M.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский госуниверситет информатики  
и радиоэлектроники, Минск, Беларусь,

<sup>2)</sup> ELETTRA Synchrotron Light Source, Триесте, Италия,

<sup>3)</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Внедрение технологий синтеза и промышленного использования водорода в качестве альтернативного источника энергии требует разработки безопасных и эффективных систем накопления, хранения и распределения сжатого водородного топлива. Поэтому вопросы взаимодействия водорода с элементами микроструктуры алюминиевых сплавов, полученных в локально-неравновесных условиях при сверхвысоких скоростях охлаждения расплава, представляют как фундаментальный, так и практический интерес в связи с особой актуальностью проблемы водородного охрупчивания высокопрочных алюминиевых материалов в энергетических технологиях.

В данной работе исследование элементного и химического состава поверхности и поперечного сечения быстрозатвердевших (БЗ) фольг Al (99.9999%) и сплавов Al-xCr ( $x=1.0$ ; 3.0 ат.%) было выполнено методом сканирующей фотоэлектронной спектроскопии с использованием синхротронного излучения. Установлена сложная композиционная структура поверхности фольг. Хром и примеси распределены по поверхности и глубине фольг неоднородно. Впервые получено, что в массиве образцов также присутствуют соединения алюминия с кислородом, что позволяет объяснить обнаруженные, ранее неизвестные, закономерности кинетики выделения водорода в БЗ алюминии и его сплавах при высоких температурах.

## ИЗОТОПНЫЕ И ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФИЦИТА КИСЛОРОДА В НАНОПОРОШКАХ ДИОКСИДА ТИТАНА

В.Б. Выходец, Т.Е. Куренных, С.И. Обухов,  
М.А. Уймин, А.Е. Ермаков  
ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

С помощью методик РОР и ЯМ исследован химический и изотопный состав нанопорошка оксида  $\text{TiO}_2$ , синтезированного с помощью газофазного метода. При его реализации в буферный газ (аргон высокой чистоты) вводилось контролируемое количество кислорода, обогащенного на 80% изотопом  $^{18}\text{O}$ . Постановка работы обусловлена обнаружением ферромагнитного состояния в нанопорошке  $\text{TiO}_2$ , несодержащего в своем составе магнитных допантов. Возможной причиной ферромагнетизма считается отклонение состава оксида от стехиометрии.

В работе получена информация о изотопном составе порошка после синтеза  $\text{Ti}^{18}\text{O}_{1,01\pm 0,03}^{16}\text{O}_{0,18\pm 0,01}$  и после хранения  $\text{Ti}^{18}\text{O}_{1,01\pm 0,03}^{16}\text{O}_{0,83\pm 0,03}$ . Вакуумный отжиг и механоактивация не привели к существенному изменению содержания кислорода в кристаллической решетке оксида.

Таким образом, в работе получены данные свидетельствующие о сильном кислородном дефиците в нанопорошке  $\text{TiO}_2$  в сравнении со стехиометрией. Они согласуются с доминирующей гипотезой о природе ферромагнетизма в нанокристаллических оксидах.

Работа выполнялась по проекту РФФИ № 15-03-06617.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ  
ДИФФУЗИИ ДЕЙТЕРИЯ В  $\text{La}_{0,9}\text{Sr}_{0,1}\text{ScO}_3$  С ПОМОЩЬЮ ЯДЕРНОГО  
МИКРОАНАЛИЗА В РЕЖИМЕ «ОН-ЛАЙН»

В.Б. Выходец<sup>1)</sup>, Т.Е. Куренных<sup>1)</sup>, О.А. Нефедова<sup>2)</sup>, С.И. Обухов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия,

<sup>2)</sup> ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Впервые решена задача получения с помощью прямого метода, основанного на законах Фика, данных по коэффициентам диффузии водорода в системах с быстрой диффузией. Основу составляет режим измерения «он-лайн». Создание источника диффузии с помощью ионной имплантации, отжиг образца и измерение в нем концентрационных профилей атомов дейтерия осуществляются одновременно. Все этапы диффузионного эксперимента выполняются с использованием методики ядерного микроанализа. Нагрев и охлаждение образцов в камере ускорителя проводился с помощью термоэлектрического модуля, основанного на эффекте Пельтье. Получены данные о диффузии дейтерия в протонном проводнике  $\text{La}_{0,9}\text{Sr}_{0,1}\text{ScO}_3$  в интервале температур от 250 до 400 К. Объектами исследований были плотная керамика и микропорошки. Энергии активации для коэффициентов диффузии, найденные прямым методом и из протонной проводимости, отличаются  $\sim 2$  раз, для прямого метода она была ниже. Эти данные имеют фундаментальное значение для понимания механизма диффузии водорода в протонных проводниках, они могут свидетельствовать о необычных корреляционных эффектах при диффузии протонов в оксидах.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 13-03-00310.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОДОРОДА С ПОВЕХНОСТЬЮ $Zr1\%Nb$ И BT1-0, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ

П.А. Белоглазова, Е.В. Березнеева, Н.С. Пушилина, Г.Е. Ремнёв, И.П. Чернов  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

Цирконий и сплавы на его основе являются важным конструкционным материалом легководных атомных реакторов и используется в его активных зонах. Титан и его сплавы широко используются в авиастроении, судостроении, медицине и т.д. В процессе эксплуатации циркониевые и титановые изделия подвергаются наводороживанию, поглощенный водород выделяется в виде хрупкой гидридной фазы и резко ухудшает механические свойства сплавов. В работе исследовалось взаимодействие водорода с модифицированной поверхностью циркониевого сплава  $Zr1\%Nb$  и титана импульсным ионным пучком углерода с длительностью импульса 80 нс, энергией 200 кэВ, плотностью тока 120 А/см<sup>2</sup> и плотностью энергии 1,5 Дж/см<sup>2</sup>.

Установлены закономерности взаимодействия водорода с модифицированным циркониевым сплавом  $Zr1\%Nb$  и техническим титаном BT1-0 импульсным ионным пучком, заключающихся в упрочнении поверхностного слоя, в замедлении образования трещин при насыщении водородом и снижении количества водорода в объеме материала, что связано с измельчением зерна сплавов в процессе облучения.

## СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СИСТЕМЕ Zr-Si-N, ОБЛУЧЕННОЙ ИОНАМИ КСЕНОНА

В.В. Углов<sup>1,2)</sup>, Г. Абади<sup>3)</sup>, С.В. Злоцкий<sup>1)</sup>, И.А. Солодухин<sup>1)</sup>,  
В.И. Шиманский<sup>1)</sup>, А.М. Сувалов<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

Покрытия на основе Zr-Si-N толщиной 230-290 нм были сформированы на подложках монокристалла Si (001) методом реактивного магнетронного распыления мишеней Zr и Si при температуре 650 °С. За счет изменения мощности на кремниевом катоде концентрация Si в покрытиях варьировалась от 3,2 до 27,0 ат. %. Сформированные покрытия облучались ионами  $\text{Xe}^{2+}$  с энергией 180 кэВ и дозами  $1 \cdot 10^{16}$  и  $5 \cdot 10^{16}$   $\text{см}^{-2}$ .

Методом рентгеноструктурного анализа обнаружено, что добавление Si в покрытие ZrN приводит к трансформации его структуры из нанокристаллического в нанокompозитное ( $C_{\text{Si}} \leq 17,2$  ат. %) состояние, представляющее собой наноразмерные (3-7 нм) частицы нитрида ZrN, окруженные аморфной матрицей a-SiN. При увеличении концентрации кремния свыше 17,2 ат. % структура сформированных покрытий становится аморфной.

Обнаружена кристаллизация фазы ZrN в аморфном покрытии ( $C_{\text{Si}} = 22,1$  ат.%) при облучении ионами Хе. При этом облучение с дозой  $5 \cdot 10^{16}$   $\text{см}^{-2}$  не приводит к изменению структурно-фазового состояния аморфного покрытия с максимальной концентрацией кремния ( $C_{\text{Si}} = 27,0$  ат. %). Выявлено, что облучение нанокристаллических и нанокompозитных покрытий приводит к релаксации в них внутренних напряжений.

В работе рассматривается модель изменения структуры и напряжений в покрытиях на основе системы Zr-Si-N при имплантации в них ионов Хе.

МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТА  
nc-TiN/a-SiN<sub>x</sub>

В.В. Углов<sup>1)</sup>, Н.Т. Квасов<sup>1)</sup>, Н.Н. Дорожкин<sup>1)</sup>, И.В. Сафронов<sup>1)</sup>  
<sup>1)</sup> БГУ, Минск, Беларусь

В данной работе теоретически определены эффективные модули упругости  $G_{\text{eff}}$ ,  $V_{\text{eff}}$  и  $E_{\text{eff}}$  нанокмозита nc-TiN/a-SiN<sub>x</sub> с учетом их зависимости от размеров и концентрации нанокристаллитов (включений) nc-TiN и упругих характеристик аморфной матрицы a-SiN<sub>x</sub> на основе подхода Эшелби (1) и статистической механики композитов (2). Моделью nc-TiN/a-SiN<sub>x</sub> является двухкомпонентная среда с изотропными компонентами. Квантовомеханическим и молекулярно-динамическим методами вычислены компоненты тензора упругих модулей  $C_{ij}$  для a-SiN<sub>x</sub> с периодическими и для nc-TiN с неперидическими граничными условиями соответственно. Упругие модули Юнга  $E$ , сдвига  $G$  и всестороннего сжатия  $V$  компонентов структуры нанокмозита рассчитаны через  $C_{ij}$ . Модули  $G_{\text{eff}}$ ,  $V_{\text{eff}}$  на основе подхода (1) определялись в рамках полидисперсной модели для больших концентраций включений, а на основе подхода (2) — путем решения в моментных функциях статистической краевой задачи по методу Грина с точностью до второй поправки. Вследствие мелкодисперсности структуры нанокмозита подход (1), на основе модели эквивалентной гомогенной среды, равноценен подходу (2), на основе модели гетерогенной среды, удовлетворяющей условию локальной эргодичности.

Моделирование показало, что включения размером около 10 нм имеют упругие модули близкие к объемным значениям соответствующих монокристаллов. При возрастании объемной доли nc-TiN и уменьшении их размеров наблюдается увеличение модулей  $G_{\text{eff}}$ ,  $V_{\text{eff}}$ . В результате показано, что при среднем размере включений  $\sim 4$  нм и их объемной доле  $c = 0,9$  модули  $G_{\text{eff}}$ ,  $V_{\text{eff}}$  и  $E_{\text{eff}}$  равны 190, 330 и 470 ГПа соответственно.

## PHOTOLUMINESCENCE QUENCHING AND DAMAGE FORMATION in GaN UNDER ION-BEAM IRRADIATION

P.A. Karaseov<sup>1</sup>, K.V. Karabeshkin<sup>1</sup>, A.I. Titov<sup>1</sup>, M.W. Ullah<sup>2</sup>, A. Kuronen<sup>2</sup>, F. Djurabekova<sup>2</sup> and K.Nordlund<sup>2</sup>

<sup>1</sup>) State Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>) University of Helsinki, Finland

Experimental investigations and molecular dynamics simulations were used to study irradiation induced effects in GaN bombarded by F, P, PF<sub>2</sub>, PF<sub>4</sub> and Ag ions with energy 0.6 keV $\mu\text{m}^{-1}$ . The damage formation and time resolved photoluminescence decay in (0001) wurzite GaN epilayer grown on sapphire substrate were studied.

It was experimentally established that irradiation with molecular ions produces thicker surface amorphous layer (SAL) comparing to constituent atomic species, whereas bulk peak (BDP) is almost same except after light F ion irradiation it is smaller. On the contrary, BDP produced by Ag ions is located deeper in the sample and its area is bigger than that for other ions. Interestingly, heavy atoms (Ag) produce smaller SAL than molecular ion of the same mass (PF<sub>4</sub>).

Time resolved PL studies revealed that molecular ion irradiation is more efficient in shortening PL decay time  $t_D$  compare to its atomic constituents. Heavy atomic ion bombardment affects  $t_D$  even stronger.

The molecular dynamics code PARCAS was used for simulation of ion-beam-irradiation induced processes in GaN. MD results show that molecular projectiles produce more big defect clusters in the surface vicinity than atoms comprising molecule. This is indication of a nonlinear cluster effect in the damage production for the molecular ion due to the higher cascade density. Heavy Ag ion produce even more dense cascades and hence is more efficient in damage-related effect formation. This finding is in good qualitative agreement with the experiments.

Work was supported by RFBR (grant 12-08-00666) and Academy of Finland under the ENIGAZ project. Grants of computer time from the Center for Scientific Computing in Espoo, Finland, are gratefully acknowledged.

## ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА СВОЙСТВА Si, ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ $^{64}\text{Zn}^+$ ПРИ ПОДОГРЕТОЙ ПОДЛОЖКЕ

В.В. Привезенцев<sup>1)</sup>, В.С. Куликаускас<sup>2)</sup>, В.В. Затекин<sup>2)</sup>,

А.В. Горячев<sup>4)</sup>, А.А. Батраков<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> ФТИАН РАН, Москва, Россия

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

<sup>3)</sup> НИУ «МИЭТ», Зеленоград, Москва, Россия

<sup>4)</sup> НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Свойства наночастиц (НЧ) окислов металлов в различных матрицах могут быть использованы в устройствах микроэлектроники. Представлены результаты исследования синтеза наночастиц ZnO в кремнии, легированном ионами цинка в условиях горячей имплантации.

Пластины CZ n-типа Si(100) были имплантированы ионами  $^{64}\text{Zn}^+$  с дозой  $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$  и энергией 50кэВ при температуре подложки 350°C. Далее образцы были изотермически отожжены в O<sub>2</sub> при 700°C в течение 1, 4 и 9ч.

Для исследования применялось резерфордское обратное рассеяние (ROR) ионов He<sup>+</sup> с энергией 1,7МэВ. Профили примесей и их ионов исследовались на времяпролетном вторично-ионном масс-спектрометре (ВП ВИМС) SIMS-5 (IonTOF GmbH). С помощью модуля из Nanofab 25 Platform (NT-MDT) были исследованы рентгеновские фотоэлектронные спектры (РФЭС).

Спектры ROR указывают, что после имплантации образуется только нарушенный слой Si толщиной 100нм. При термообработках дефекты отжигаются, а максимум концентрации Zn перемещается вначале вглубь подложки, а затем к ее поверхности. Спектры ВП ВИМС подтверждают эти закономерности, а также свидетельствуют, что при отжиге у поверхности увеличивается доля оксидных соединений, в том числе ZnO, с постепенным их распространением вглубь подложки. Из спектров РФЭС следует, что вблизи поверхности как после имплантации, так и после отжига обнаружена фаза Zn; после отжига вблизи поверхности появляется дополнительно фаза ZnO.

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В КОМПЕНСАЦИИ ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ РАДИАЦИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ

В.В. Козловский<sup>1)</sup>, А.Э. Васильев<sup>1)</sup>, В.В. Емцев<sup>2)</sup>, А.А. Лебедев<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,

<sup>2)</sup> Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН

Представлена модель компенсации электропроводимости полупроводников при электронном облучении. В качестве основных трех процессов, приводящих к снижению концентрации носителей заряда, рассматриваются:

- формирование глубоких ловушек собственными точечными дефектами – парами Френкеля, образующимися при облучении;

- «деактивация» легирующей примеси путем образования нейтральных комплексов, включающих атом легирующей примеси и точечный радиационный дефект;

- перевод примесного атома из мелкого донорного состояния в глубокое акцепторное состояние за счет образования заряженных комплексов.

Для определения механизма компенсации экспериментально исследованы дозные зависимости эффекта глубокой компенсации умеренно легированных n-Si, n-SiC и n-GaAs при облучении электронами с энергией 0.9 МэВ. Обнаружено, что для SiC и GaAs характерны линейные зависимости, а для Si свойственна сугубо нелинейная зависимость. Подтверждено, что компенсация проводимости SiC и GaAs происходит за счет глубоких ловушек, обусловленных собственными первичными радиационными дефектами. Для кремния компенсация связана с формированием вторичных радиационных дефектов, в состав которых входит атом легирующей примеси.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ЗАЩИТНЫХ СЛОЕВ, ФОРМИРУЕМЫХ НА СТАЛЯХ ИОННО-АССИСТИРУЕМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ КАДМИЯ И ЦИНКА

В.В. Поплавский, А.В. Дорожко, В.Г. Матыс  
Белорусский государственный технологический университет,  
Минск, Беларусь

Исследованы слои, формируемые осаждением кадмия и цинка на образцах углеродистой стали Ст3 и нержавеющей стали 12Х18Н9Т с целью защиты алюминия и алюминиевых сплавов от контактной коррозии при фиксации конструкций на основе алюминия с помощью стального крепежа. Актуальность работы обусловлена тем, что осаждение наиболее подходящих для этой цели кадмиевых и цинковых покрытий гальваническими методами сопряжено с серьезными экологическими и техническими проблемами.

Формирование слоев проведено в режиме IBAD, при котором осаждение металла и перемешивание осаждаемого слоя с атомами поверхности подложки ускоренными ( $U = 5$  кВ) ионами того же металла осуществляются соответственно из нейтральной фракции пара и плазмы вакуумного дугового разряда импульсного электродугового ионного источника. Исследование морфологии и состава получаемых поверхностных слоев проведено методами SEM и EPMA (микроскоп JSM-5610 LV и анализатор EDX JED-2201, JEOL;  $E = 20$  кэВ) и RBS ( ${}^4\text{He}$ ,  $E_0 = 1,2$  МэВ; ускорительный комплекс AN-2500, High Voltage Engineering Europe). Установлено, что в состав слоев входят атомы осаждаемого металла, материала подложки, а также примесей кислорода и углерода. По данным RBS толщина слоев составляет  $\sim 100$  нм; интегральное содержание атомов осаждаемых металлов на поверхности –  $\sim 10^{16} - 10^{17}$  см $^{-2}$ .

Ресурсные испытания коррозии алюминия марки А7 и алюминиевого сплава Д16 в контакте с исследуемыми материалами, проведенные в соответствии с ГОСТ 9.913-90 методом погружения в 3% NaCl + 0,1 % H $_2$ O $_2$ , подтверждают эффективность ионно-лучевого модифицирования поверхности сталей. В сравнении с гальваническим вакуумное формирование защитных слоев в предложенном режиме отличается простотой подготовки поверхности подложек, одностадийностью, экологической безопасностью и экономичностью.

## ЭЛЕМЕНТНЫЙ ПОСЛОЙНЫЙ АНАЛИЗ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ СТРУКТУР Мо ПЛЕНКА / СТЕКЛЯННАЯ ПОДЛОЖКА, ФОРМИРУЕМЫХ ПРИ АССИСТИРОВАНИИ СОБСТВЕННЫМИ ИОНАМИ

О.М. Михалкович<sup>1)</sup>, О.Г. Бобрович<sup>2)</sup>, И.С. Ташлыков<sup>1)</sup>,  
В.С. Куликаускас<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> БГПУ, Минск, Беларусь,

<sup>2)</sup> БГТУ, Минск, Беларусь,

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

Одним из перспективных методов модифицирования свойств поверхности является осаждение покрытий, ассистированное собственными ионами (ОПАСИ). Мо пленки осаждались на стекло при ускоряющем потенциале на мишени в 10 кВ, при давлении в вакуумной камере в  $10^{-2}$  Па. Скорость осаждения покрытий составляла 0,1-0,2 нм/мин. Элементный послойный анализ конструкций пленка/подложка выполняли используя Резерфордское обратное рассеяние (РОР) ионов  $\text{He}^+$  с энергией 1,7 МэВ ( $\Delta E=15$  кэВ) и геометрией рассеяния  $\Theta_1=0^\circ$ ,  $\Theta_2=20^\circ$ ,  $\Theta_3=160^\circ$ , и компьютерное моделирование экспериментальных спектров РОР по программе RUMP. Гидрофильность оценивали по равновесному краевому углу смачивания (РКУС), определяемому методом сидячей капли, объем капли 9,3 мкл. Параметры морфологии определяли с помощью сканирующего зондового микроскопа NT -206.

На поверхности стекла формировались пленки толщиной до  $\sim 50$  нм. В состав пленок кроме атомов наносимого Мо входят атомы О, С и Н, а также атомы Si, Na и Ca. Средняя шероховатость ( $R_a$ ) полученных пленок составляла 2,3 нм, что соизмеримо с шероховатостью исходного стекла (2,2 нм) и соответствует наивысшему классу точности обработки поверхности. Значение РКУС полученных Мо пленок составляет порядка  $65^\circ$  и им можно управлять варьируя толщиной пленки. Аналогичные по составу и свойствам пленки были получены также при осаждении пленок различных металлов на кремний методом ОПАСИ. Таким образом, этот метод позволяет получать пленки с хорошо воспроизводимым составом и управляемыми свойствами.

## СОСТАВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР МЕТАЛЛ/БЕРИЛЛИЙ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ ИОННО-АССИСТИРУЕМЫМ НАНЕСЕНИЕМ ПОКРЫТИЙ

И.С. Ташлыков<sup>1)</sup>, В.В. Тульев<sup>2)</sup>

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

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

В работе изучался элементный состав и распределение элементов по глубине в структурах Me/Be, полученных ионно-ассистируемым осаждением тонких пленок на основе металлов (Me=Cr, Ti, Cu, W) на подложку из бериллия. Нанесение покрытий происходило в вакууме в мишенной камере  $\sim 10^{-2}$  Па. Плотность ионного тока составляла 6-20 мкА/см<sup>2</sup> при интегральном потоке ассистирующих ионов  $(1-2) \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> и ускоряющем напряжении 20 кВ. Для послойного элементного анализа использовался метод резерфордского обратного рассеяния (ROP) ионов гелия в сочетании с компьютерным моделированием. Энергия ионов гелия составляла 2,0 МэВ, угол влета 0°, угол вылета 15°, угол рассеяния 165°.

Исследования показали, что на бериллии формируется тонкопленочная структура толщиной  $\sim 50$  нм. В состав пленки входят атомы осажденного металла (0,5-3,3 ат.%), атомы технологических примесей С (0,8-1,8 ат.%) и О (6,3-9,9 ат.%), атомы Be из подложки (рис. 1).

Установлено что содержание кислорода в покрытии возрастет по сравнению с исходным образцом и достигает наибольшего значения при осаждении покрытия на основе Cr и Ti. А содержание углерода в покрытии при этом уменьшается, и достигает своего наименьшего значения при осаждении покрытия на основе W.

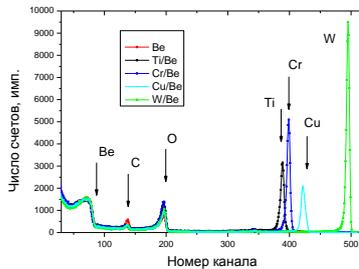


Рис. 1 Спектр ROP ионов гелия от образцов Be до и после осаждения покрытий

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ В СБОРКАХ ИЗ ДВУХ Zr, Ti И Ni ФОЛЬГ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

А.Ю. Дидык<sup>1</sup>, А.А.Ерискин<sup>2</sup> В.С.Куликаускас<sup>3</sup>,  
П.В.Силин<sup>4</sup>, В.Я.Никулин<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций имени Г.Н.Флерова, Дубна, Россия

<sup>2</sup>Высшая школа экономики, МИЭМ НИУ, Москва, Россия

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

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

Образцы в виде сборки из двух плотно прижатых Zr (0,3 мм), Ti (0,25 мм) и Ni (0,1 мм) фольг были облучены 15-ю импульсами дейтериевой высокотемпературной плазмы (до 10 кэВ) на установке «Плазменный фокус» (ПФ-4, ФИАН) [1, 2] для создания ударных волн и имплантации ионов дейтерия. Параметры ПФ-4 и условия воздействия дейтериевой плазмы и послерадиационных исследований описаны в [1, 2]. Осуществлялось измерение выхода нейтронов из всехборок фольг. Проведенные исследования всех фольг с обеих сторон методом регистрации ядер отдачи (ERDA) показали, что ионы дейтерия под действием ударных волн выбиваются из первой фольги и проникают во вторую фольгу того же состава, а исходно присутствующий в образцах водород перераспределяется. Измеренные глубинные профили всех распределений и интегральные концентрации дейтерия и водорода с обеих сторон каждой из фольг представлены. Модель, описывающая обнаруженные эффекты выбивания имплантированного в первую фольгу дейтерия и перераспределения примесей обсуждается. Выполнены РЭМ исследования изменений поверхности и элементного состава проведены, результаты обсуждаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Ю.Дидык, И.В.Боровицкая, Р.Вишневски и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013, № 1, с. 22–26.
2. A.Yu.Didyk, L.I.Ivanov, O.N.Krokhin et al. // Doklady Physics, 2012, V. 57, No. 1, pp.7–9.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ В СБОРКЕ ИЗ ДВУХ W  
ФОЛЬГ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ДЕЙТЕРИЕВОЙ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

А.Ю.Дидык<sup>1</sup>, А.А.Ерискин<sup>2</sup>, В.С.Куликаускас<sup>3</sup>,  
П.В.Силин<sup>4</sup>, В.Я.Никулин<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ОИЯИ, Лаборатория ядерных реакций имени Г.Н.Флерова, Дубна, Россия

<sup>2</sup>ВШЭ, МИЭМ НИУ, Москва, Россия

<sup>3</sup>НИИЯФ имени Д.В.Скобелевича МГУ, Москва, Россия

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

Образцы в виде сборки плотно прижатых двух W-фольг (230 мкм), прокатанных и из спеченного порошка были облучены 10-ю импульсами дейтериевой высокотемпературной плазмы (до 10 кэВ) на установке «Плазменный фокус» (ПФ-4, ФИАН) [1, 2] для создания ударных волн и имплантации ионов дейтерия. Параметры ПФ-4 и условия воздействия N<sup>+</sup>- плазмы и послерадиационных исследований описаны в [1, 2]. Осуществлялось измерение выхода нейтронов из W фольг. Выполнен РЭМ анализ структуры поверхности и элементного состава облученных W фольг.

Проведенные РБС и ERD исследования всех фольг с обеих сторон показали, что ионы дейтерия под действием ударных волн выбиваются из первой W-фольги и проникают во вторую W-фольгу, а исходно присутствующий в образцах водород перераспределяется. Измеренные глубинные профили всех распределений и интегральные концентрации дейтерия и водорода с обеих сторон каждой из фольг представлены. Модель, описывающая обнаруженные эффекты выбивания дейтерия из первой W-фольги, имплантированной дейтерием, и перераспределения водорода, обсуждается.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Ю. Дидык, И.В. Боровицкая, Р. Вишневецки и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013, № 1, с. 22–26.
2. A.Yu. Didyk, L.I. Ivanov, O.N. Krokhin et al. // Doklady Physics, 2012, V. 57, No. 1, pp.7–9.

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ КСЕНОНА НА ПАРАМЕТРЫ  
КРЕМНИЕВЫХ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ СТРУКТУР,  
СФОРМИРОВАННЫХ С ПОМОЩЬЮ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ  
ПОТОКОВ

В.В. Углов<sup>1)</sup>, Н.Т. Квасов<sup>1)</sup>, В.М. Асташинский<sup>2)</sup>, Р.С. Кудактин<sup>2)</sup>, А.М. Кузьмицкий<sup>2)</sup>, В.А. Скуратов<sup>3)</sup>

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

<sup>2)</sup> Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

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

Компрессионные плазменные потоки (КПП) представляют собой особый вид концентрированных потоков энергии, характеризуемый высокой плотностью энергии ( $3 - 30 \text{ Дж/см}^2$ ) и малой продолжительностью воздействия ( $\sim 100 \text{ мкс}$ ). После обработки КПП монокристаллического кремния дырочного типа проводимости в нём возникает фотовольтаический эффект с фото-ЭДС 300–400 мВ.

В данной работе представлены результаты исследования радиационной стойкости кремниевых фотовольтаических структур, облучённых ионами Хе с энергией 167 МэВ.

Фото-ЭДС до облучения составляла 400 мВ. После ионного облучения с дозами: (1) –  $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и (2) –  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  фотовольтаический эффект исчез. Однако после отжига при температуре  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  фотовольтаический эффект вновь появился: для дозы (1)  $\sim 200 \text{ мВ}$ , для дозы (2)  $\sim 100 \text{ мВ}$ .

Исчезновение фотовольтаического эффекта сразу после ионного облучения связано с образованием точечных дефектов, которые являются центрами рекомбинации свободных носителей заряда. Наличие фото-ЭДС после отжига, приводящего к исчезновению точечных дефектов, свидетельствует о том, что фоточувствительный слой частично сохраняет свои свойства и структуру после высокоэнергетического ионного облучения.

КОНТРОЛЬ РАДИАЦИОННЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ СЕНСОРАМИ НА ОСНОВЕ  
МДП-СТРУКТУР

В.В. Андреев<sup>1)</sup>, Г.Г. Бондаренко<sup>2)</sup>,  
И.В. Соловьев<sup>1)</sup>, Д.М. Ахмелкин<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

В данной работе контроль радиационных излучений проводится на основе анализа ионизационных процессов, протекающих в диэлектрической пленке МДП-структур. В процессе контроля радиационных излучений МДП-структура постоянно поддерживается в режиме заряда или разряда ее емкости за счет подачи на нее требуемой последовательности токовых импульсов, при этом структура, как правило, находится в области слабых электрических полей, что уменьшает деградационные процессы в диэлектрике и на границе раздела с полупроводником и увеличивает срок работы сенсора /1/. Величина ионизационного тока определяется по временной зависимости напряжения на МДП-структуре /1/.

Проведена апробация предложенного метода при контроле  $\alpha$ -частиц, создаваемых источником  $^{239}\text{Pu}$ , и нейтронного излучения при использовании  $^{238}\text{Pu-Be}$  источника. Показана возможность контроля этих радиационных излучений с использованием МДП-структур, изготавливаемых по стандартному технологическому процессу КМДП интегральных микросхем, с возможностью встраивания их в микросхему.

Работа выполнена в рамках реализации проекта министерства образования и науки РФ.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Андреев В.В., Бедняков А.А., Бондаренко Г.Г., Кузнецов Н.В., Новиков Л.С., Соловьев Г.Г., Столяров А.А., Лоскутов С.А. // Физика и химия обработки материалов, 2001, № 3. С.5-11.

МОДИФИКАЦИЯ МДП-СТРУКТУР  
ЭЛЕКТРОННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ И СИЛЬНОПОЛЕВОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ  
ЭЛЕКТРОНОВ

Д.В. Андреев<sup>1)</sup>, Г.Г. Бондаренко<sup>2)</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

В данной работе рассмотрена возможность модификации структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) с пленкой SiO<sub>2</sub>, легированной фосфором, путём облучения кристаллов низкоэнергетическими электронами и сильнополевой туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик.

Для изучения влияния воздействия электронного облучения на характеристики МДП-структур использовался растровый электронный микроскоп EVO 40 фирмы Zeiss. С его помощью было проведено облучение МДП-структур электронами с энергией от 15 до 20 кэВ и током пучка  $I = 8$  нА с флюенсом до  $5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>. Технология создания МДП-структур описана в /1/.

Установлено, что при облучении электронами по сравнению с сильнополевой инжекцией при одинаковом флюенсе в подзатворном диэлектрике накапливается более низкая плотность отрицательного заряда. Найдено, что для получения термостабильного зарядового состояния МДП-структур как после облучения, так и после сильнополевой инжекции электронов их необходимо отжигать при 200 °С.

Работа выполнена в рамках реализации проекта министерства образования и науки РФ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Андреев В.В., Бедняков А.А., Бондаренко Г.Г., Кузнецов Н.В., Новиков Л.С., Соловьев Г.Г., Столяров А.А., Лоскутов С.А. // Физика и химия обработки материалов, 2001, № 3. С.5-11.

## ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИОННО-МОДИФИЦИРОВАННОЙ ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВОВ ЦИРКОНИЯ

А.С. Яшин, Н.В. Волков, Р.А. Валиков  
НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

Как известно, защитные свойства оксидных пленок, формируемых на внешней поверхности изделий из сплавов циркония, существенно зависят от состояния приповерхностного слоя материала. Одним из наиболее эффективных методов финишной обработки поверхности трубчатых изделий является ионно-пучковая обработка.

Обработка образцов была проведена на установке ИЛУР-03 пучком ионов  $Ag^+$  с широким энергетическим спектром 0,1-3,5 кэВ в дозовом диапазоне  $(1-10) \times 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>. Изучено изменение шероховатости и микротвердости обработанной поверхности и состояния приповерхностного слоя материала методами оптической и ионной растровой микроскопии.

Обнаружено, что в результате удаления материала толщиной 1-2 мкм посредством физического распыления формируется сглаженный рельеф поверхности, снижается количество и глубина технологических царапин, повышается однородность структуры приповерхностного слоя материала. Анализ полученных результатов свидетельствует, что стандартные методы оценки состояния поверхности недостаточны. В качестве более детального анализа состояния поверхности предложен статистический метод, который позволил по профиллограммам выявить особенности состояния поверхности со случайной и периодической компонентами. В результате проведенных работ были уточнены оптимальные параметры облучения радиальным пучком ионов аргона.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА  
ПРОЦЕСС ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В КРЕМНИИ МЕТОДАМИ ESR, RBS-C  
И PIXE

Е.В. Окулич<sup>1)</sup>, А.Н. Михайлов<sup>1)</sup>, Д.В. Гусейнов<sup>1)</sup>,  
А.А. Шемухин<sup>2)</sup>, Балакшин Ю.В.<sup>2)</sup>, Д.И. Тетельбаум<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> ННГУ им. Н.И.Лобачевского, Н.Новгород, Россия

<sup>2)</sup> НИИЯФ им. Д.В.Скобельцына, Москва, Россия

Ионное облучение достаточно давно внедрено в технологический процесс производства микроэлектронных изделий; идёт её адаптация в нанотехнологии. Вопросы эволюции радиационных дефектов в этой области являются одними из наиболее актуальных. Несмотря на обилие экспериментальных и теоретических исследований /1/ остаются недостаточно ясными процессы вторичного дефектообразования и их влияние на такие характеристики, как, зависимости концентраций дефектов и степени аморфизации кристаллической структуры от дозы, плотности ионного тока, температуры и вида ионов. В /2/ были представлены результаты моделирования этих процессов на основе разработанной в /3/ теории вторичного дефектообразования. Для проверки найденных закономерностей были проведены экспериментальные исследования в данном направлении. Образцы кремния облучались ионами различных элементов с вариацией указанных выше параметров. Комплексная оценка степени их дефектности проводилась с использованием различных методик: ESR, RBS-C и PIXE. Экспериментальные результаты сравниваются с результатами расчётов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. L.Pelaz, L.A.Marques, J.Barbolla, //, J.Appl.Phys. v.96, №11, 5947, (2004).
2. Д.И. Тетельбаум, В.И. Окулич, Е.В. Окулич, Дефектообразование и аморфизация при ионном облучении кремния: тез. докл. V Всеросс. конф. ФФХОИИ. НН: ННГУ, 2014, с.75-76.
3. Morozov N.P., Tetelbaum D.I., //, Phys. Stat. Sol. (a), 1979, V. 51, № 2, P 629-640.

## АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ В БИНАРНЫХ СИСТЕМАХ ПОСЛЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ИЗ РАСПЛАВА

Г.А. Вершинин, Г.И. Геринг, Т.В. Панова, Г.Л. Бухбиндер  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

В последнее время особый интерес вызывают процессы высокоскоростного затвердевания бинарных сплавов, инициированные глубоким переохлаждением поверхности фазового превращения, когда процесс кристаллизации протекает, по-видимому, вдали от локального равновесия, что оказывает существенное влияние на формирование микро- и макроструктуры образующейся твердой фазы, ее физико-химические свойства, распределение примесей и возможных дефектов. В работах /1,2/ при исследовании структурно фазовых превращений и физико-механических свойств сплавов системы Al-Me (Me=Fe, Cu, Co, Ni, Sb) и Al-Si, полученных сверхбыстрой закалкой из расплава, обнаружены в тонком (0,04-0,06 мкм) слое на поверхности фольг повышенное содержание легирующих элементов и осцилляции их концентраций по всей толщине исследованных слоев. В данной работе для описания указанных закономерностей применена локально неравновесная модель диффузии растворенного компонента при высоко скоростном затвердевании бинарных сплавов. Исследовано влияние локальной неравновесности на процесс разделения примеси и показано, что формирование их концентрационных профилей обусловлено волновым механизмом массопереноса.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. И.И. Ташлыкова – Бушкевич, В.Г. Шепелевич //ФизХОМ, 2000, № 4, с. 99.
2. И.И. Ташлыкова – Бушкевич, и др.// ФизХОМ, 2004, №3, с. 75.

## ОБЛУЧЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МОЩНЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.С. Ковивчак, Т.В. Панова, К.А. Михайлов  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,  
г. Омск, Россия

Воздействие мощного ионного пучка (МИП) на различные металлы и сплавы приводит к изменению поверхностной морфологии и, прежде всего, к образованию кратеров. Однако до сих пор нет однозначного понимания механизмов кратерообразования.

В работе исследованы изменения морфологии поверхности (в т.ч. образование кратеров) и состава приповерхностного слоя алюминиевого сплава Д16АТ предварительно нагретого перед воздействием МИП.

Облучение выполнялось на ускорителе «Темп» протон-углеродным пучком: 30%  $H^+$  + 70%  $C^+$ ,  $E = 250$  кэВ,  $j \leq 150$  А/см<sup>2</sup>,  $\tau=60$  нсек. В экспериментах варьировалась плотность тока пучка (50-150 А/см<sup>2</sup>), число импульсов облучения (1-5) и температура образца в момент облучения (от 20 до 300°С). Поверхность облученного сплава исследовали с помощью растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа.

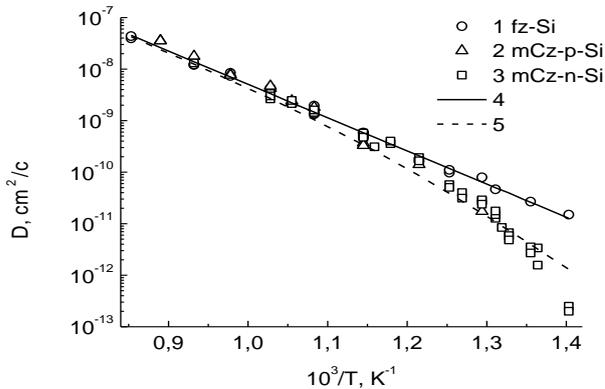
Установлено, что облучение МИП сплава Д16АТ при повышенных температурах приводит к уменьшению высоты, а так же снижению поверхностной плотности кратеров. Наиболее сильно это проявляется при температуре образца 300 °С. При этом существенного изменения состава поверхностного слоя (по сравнению с облучением при более низких температурах) не наблюдается. Так по сравнению с облучением МИП при 20°С поверхностная плотность кратеров снижается от  $3,9 \cdot 10^4$  см<sup>-2</sup> до  $2 \cdot 10^3$  см<sup>-2</sup>. Наблюдаемые изменения морфологии поверхности рассмотрены с точки зрения ускоренной релаксации возмущения расплавленного поверхностного слоя сплава, происходящей при более высокой температуре облучаемого образца.

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИФФУЗИЯ ИМПЛАНТИРОВАННОГО В КРЕМНИЙ НАТРИЯ

А.В. Заставной, В.М. Король

НИИ Физики ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия

Согласно данным [1,2] кислород в Si замедляет диффузию донорных атомов натрия при  $T_{отж}=700-500^{\circ}\text{C}$ , что связано с образованием предположительно комплексов Na-O. В настоящей работе подобные исследования проведены при более низких температурах  $T_{отж}=500-440^{\circ}\text{C}$ . Длительность разгонки примеси составляла от 150 часов до одного месяца. Измеренные зависимости коэффициента диффузии донорных атомов Na для «чистого» (fz-Si) и тигельного магнитного (mCz-Si) показаны на рисунке.



Экспериментальные точки для fz-Si аппроксимированы прямой 4 с параметрами диффузии  $E_a=1,29$  эВ и  $D_0=1,45 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с. При аппроксимации данных mCz-Si (штриховая линия 5) использована формула  $D_{Cz} = D_{fz} / (1 + N_o/C) / 2$ , в которой  $N_o$  – концентрация кислорода,  $C = C_o \exp(\Delta E/kT)$  – константа диссоциации комплекса Na-O.  $\Delta E$  – энергия активации этого комплекса. Штриховая линия характеризуется параметрами:  $\Delta E = 0,85$  эВ и  $C_o = 4,5 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup>.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Король В.М., Веденяпин С.А., Заставной А.В., V. Ovchinnikov // ФТП, 2009, № 4, с. 1140–1144.
2. Заставной А.В., Король В.М. // Поверхность, 2014, №11, с. 93–95.

## ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ КРЕМНИЯ ПОД ИНДЕНТОРОМ В УСЛОВИЯХ МАЛОДОЗОВОГО БЕТА-ОБЛУЧЕНИЯ

Д.Г. Гусева, А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Ефремова, А.О. Жигачев  
ГТУ имени Г.Р. Державина, Тамбов, Россия  
E-mail: [dmitr2002@tsu.tmb.ru](mailto:dmitr2002@tsu.tmb.ru)

Механические воздействия, фазовый состав и приповерхностные свойства монокристаллического Si являются взаимосвязанными. Этим обусловлены фазовые превращения (ФП) и связанные с ними изменения свойств кремния (вплоть до перехода в проводящее состояние /1/), наблюдаемые при локальном нагружении. Процесс ФП кремния в различных условиях нагружения изучен достаточно полно /2/. Однако вопросы, связанные с влиянием слабых радиационных полей на процесс ФП в условиях сосредоточенных нагрузок остаются открытыми.

В работе развит (впервые предложенный в /1/) метод *in situ* регистрации ФП кремния Si-I→Si-II, основанный на синхронной регистрации *P-h*-диаграмм (нагрузка-глубина внедрения) и электрического сопротивления измерительной ячейки при внедрении индентора в узкий зазор между тонкими золотыми пленками, выполняющими функции омических контактов. Подобраны оптимальные параметры измерительной ячейки, а также режимы воздействий и контроля, позволившие достичь необходимой (высокой) чувствительности метода к изменению фазового состава Si. Получены результаты, свидетельствующие о бета-индуцированном ( $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  источник, интенсивность  $I = 1,3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , флюенс  $F = 2,34 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ) подавлении процесса формирования фазы Si-II под индентором.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-02-04797 а.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Gridneva I.V., Milman Yu.V., Trefiliv V.I. // Phys. Stat. sol. (a), 1972, № 14, P. 177.
2. Dominich V., Gogotsi Y. // Rev. Adv. Mater. Sci., 2002, № 3, P. 1.

## ЛОКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ТИТАНА

Н.А. Тимченко<sup>1)</sup>, С.И. Кузнецов<sup>1)</sup>, О.В. Крысина<sup>2)</sup>,  
М.С. Сыртанов<sup>1)</sup>, С.В. Бондаренко<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

В настоящее время наиболее эффективными методами создания на поверхности многофазных нанокристаллических слоев и покрытий со средним размером зерен менее 100 нм являются пучковые и плазменные технологии /1/.

Для разработки технологий нанесения покрытий представленными методами необходимо установление фазового состава и структурных особенностей, которые характеризуют состояние нанокристаллических слоев и покрытий в процессе формирования. Для решение таких задач необходимо использовать как дифракционные методы, так и методы, основанные на исследовании XAFS-спектроскопии.

В настоящей работе исследованы образцы с покрытием на основе нитрида титана с примесями меди, кремния и хрома в том числе и после обработки сильноточным электронным пучком.

Дифракционные измерения и измерение XAFS-спектров в покрытиях проводились на станции структурного материаловедения Курчатовского источника синхротронного излучения. Получены рентгеновские спектры поглощения в области К-края поглощения титана в образцах нанокристаллического покрытия из нитрида титана. По результатам измерений вычислены расстояния между атомами титана и атомами титана и азота.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Тимченко Н.А. и др. // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – №11/3. – С. 53-56.

ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР ПРИ  
ОБЛУЧЕНИИ В НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛЯХ

Н.И. Ваганова, Л.К. Израилева, Э.Н. Руманов  
ГБУН Институт структурной макрокинетики и материаловедения  
РАН Г.Черноголовка, РФ

В последние годы область применения наноструктур расширилась и, соответственно, требования к размерам и свойствам частиц исходных материалов и матрицы стали весьма разнообразными. Технологии тоже меняются. Появились СВС с высокотемпературным сжатием, СВС-экструзия при сдвиговых напряжениях /1/, ЛЭД-лазерное электродиспергирование, химические технологии с возбуждением плазменных колебаний в наночастицах металлов /2/. Излучение, генерируемое плазмонами, применяется в новом типе лазеров – спайзерах, а в системах в составе ядерных эмульсий – для детектирования ядер и элементарных частиц высокой энергии. При разных применениях наноструктур изучение протекающих при этом процессов может позволить судить об эффективности методов.

В этой работе рассматривается задача о наночастице металла, в которой при облучении возбуждаются поверхностные плазмоны, также может возникнуть заряд на поверхности и вследствие этого вблизи частицы появляются неоднородные температурные и электрические поля и динамические напряжения (модель /3/, но для сферической частицы). При этом перераспределяются потоки атомов. наночастица растёт или растворяется. Оценена роль свойств частицы и среды (размерное квантование - для частицы, ширина запрещённой зоны в среде и т.д.).

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А.М. Столин, П.М. Бажин // Российские нанотехнологии, 2014, т.9, вып.9, с.6.
2. А.О. Рыбалтовский, С.С. Илюхин // Российские нанотехнологии, 2014, т.9, вып.5.
3. Л.К. Израилева, Э.Н. Руманов // Поверхность, вып.3, с.79.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ С ПОМОЩЬЮ ИОННО-ПУЧКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рогожин А.Е.<sup>1)</sup>, Руденко К.В.<sup>1)</sup>, Мяконьких А.В.<sup>1)</sup>, Черныш В.С.<sup>2)</sup>, А.А. Шемухин<sup>2)</sup>, Балакшин Ю.В.<sup>2)</sup>, Рудаков В.И.<sup>3)</sup>  
<sup>1)</sup> ФТИАН, Москва, Россия  
<sup>2)</sup> НИИЯФ МГУ, Москва, Россия  
<sup>3)</sup> ЯрГУ, Ярославль, Россия

Проблема поиска материалов для затворных структур нанотранзисторов, которые обеспечили бы высокую емкость структуры при низких токах утечки, является одной из ключевых в наноэлектронике. Смена подзатворного диэлектрика с оксинитрида кремния на материал с высокой диэлектрической проницаемостью на основе гафния в сочетании с переходом к металлическим электродам, позволила временно решить проблему. Тем не менее, рост промежуточного слоя со сравнительно низкой диэлектрической проницаемостью ( $k=4-7$ ) на границе диэлектрик – полупроводник ограничивает применение этих материалов. Для создания затворных структур с эквивалентной толщиной диэлектрического стека менее 0,68 нм необходима разработка технологических процессов, которые позволили бы избежать формирования промежуточного слоя, повысить емкость структуры и снизить эквивалентную толщину оксида.

В работе исследован механизм образования переходного слоя в процессе осаждения  $\text{HfO}_2$  методом томно-слоевого осаждения с предварительной плазменной обработкой. С применением методов ПЭМ, ВИМС, РОР и СРИСЭ показано, что переходный слой образуется, в меньшей степени, за счет взаимодействия кремния с атмосферой и, в большей степени, за счет диффузии кислорода через растущий слой  $\text{HfO}_2$  на этапе окисления. В результате толщина переходного слоя с низкой диэлектрической проницаемостью после осаждения может достигать 1-2 нм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-00844 А.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ НА  
РАЗУПОРЯДОЧЕНИЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА В ПЛЕНКАХ КРЕМНИЯ НА  
САПФИРЕ

А.А. Шемухин<sup>1)</sup>, Балакшин Ю.В.<sup>1)</sup>, Назаров А.В.<sup>1)</sup>, Воробьева Е.А.<sup>1)</sup>, Кожемяко  
А.В.<sup>2)</sup>, Медведев В.А.<sup>2)</sup>

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

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

Для изготовления современных электронных приборов с высоким быстродействием с помощью технологии кремний-на сапфире толщина кремниевого слоя должна быть менее 100 нм. Однако, такие структуры обладают большим количеством дефектов. Уменьшить плотность структурных дефектов близки границы раздела кремний-сапфир путем ее разрушения с помощью ионного облучения и последующей рекристаллизации в твёрдой фазе. Обычно облучение проводится при температурах жидкого азота. Однако, использование низких температур является серьезным ограничением. При нагреве до комнатных температур в КНС-структуре возникают внутренние напряжения, которые в последствии ограничивают применение пленок кремния.

В данной работе изучены физические механизмы дефектообразования под действием ионного облучения и последующей рекристаллизации в твердой фазе, а также разработаны технологические процессы, позволяющие получить структуры кремний-на-сапфире с высоким качеством кристалличности с толщиной эпитаксиального слоя менее 100 нм при комнатных температурах.

Контроль разрушения и состава работы осуществлялся с помощью методики РОР и СРИСЭ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК 15-07-99656/15 от 28 января 2015.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ (С, Mn, Cr, Si) В  
ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СТАЛИ, ОБРАБОТАННОЙ ВАКУУМНЫМ  
ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ

В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, И.Х. Худойкулов, Б.Р.Кахрамонов  
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий  
АНРУз, Ташкент, Узбекистан; [arustamov@aie.uz](mailto:arustamov@aie.uz)

При прохождении катодного пятна (КП) вакуумной дуги по металлической поверхности происходит сильный местный разогрев «микро-области» 2-5 мкм. Распределение температуры в зоне воздействия КП приводит к перераспределению легирующих элементов в этой приповерхностной зоне. Проведенный анализ очищенной поверхности на рентгеновском анализаторе фирмы «Комеса» показал, что распределение легирующих элементов углерода, марганца, хрома в исходном образце относительно равномерно. А в образце, обработанном вакуумным дуговым разрядом, изменилось и связано со следами КП. В центре КП легирующие вещества почти отсутствуют вследствие интенсивного испарения. Из-за высокой скорости прохождения КП на его границе наблюдается перепад температур и быстрое охлаждение расплава, в результате чего происходит накопление легирующих элементов. Картины, наблюдаемые для кремния и углерода, очень схожи, благодаря близким значениям коэффициентов диффузии этих элементов в феррите. (Для углерода при  $1500^{\circ}\text{C}$   $D = 5.4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ , для кремния при  $1500^{\circ}\text{C}$   $D = 8.4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ . Для хрома и марганца картина повторяется не так отчетливо вследствие, во-первых, более высокого содержания марганца в этих сталях по сравнению с другими легирующими элементами (С ~ 0.7%, Cr, Si ≤ 0.25%, Mn ≤ 1.6%), во-вторых, из-за того, что коэффициент диффузии хрома (при  $1500^{\circ}\text{C}$   $D = 8.4 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ ) гораздо ниже соответствующих значений для углерода и кремния.

## К ВОПРОСУ О БРОСКАХ НАПРЯЖЕНИЯ ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА

В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, Р.Б. Нагайбеков, Х.Х. Кадыров, И.Х. Худайкулов.

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий  
АНРУз, Ташкент, Узбекистан; [arustamov@aiie.uz](mailto:arustamov@aiie.uz)

Рассмотрено влияние самоиндукции на формирование перенапряжения при резких колебаниях тока вакуумного дугового разряда. Исследование проводилось в режиме импульсного дугового разряда в вакууме, при давлении остаточной среды  $10^{-4}$  Па. Исследовалась зависимость распределения  $\frac{\Delta n}{n} = f(U)$ . Установлено, что наиболее часто встречаются относительно небольшие всплески напряжения (10-90 В), число всплесков с амплитудой 200-400 В существенно меньше. Причем значение величины индуктивности практически не влияют на величину амплитуды всплесков. Это означает, что всплески напряжения в прикатодной области дугового разряда в вакууме имеют внутреннюю, присущую самому разряду природу. Полученные экспериментальные результаты можно объяснить тем, что объёмный заряд ионов отбрасывается от поверхности катода струёй плазмы, возникающей в результате процесса микровзрыва в катодном пятне. Высокие сечения резонансной перезарядки ( $\sigma_{pn} = 10^{-14}$  см<sup>2</sup>) повышают вероятность таких процессов, если выполняется условие  $n_a \sigma_{pn} l \rightarrow 1$ , где  $n_a$  - концентрация атомов в струе плазмы,  $l$  - протяжённость катодного пятна). Учитывая, что протяжённость катодного пятна составляет  $\sim 10^{-4}$  см, то концентрация атомов в струе составляет  $n_a \approx \frac{1}{\sigma_{pn} l} \approx 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Для выполнения условия достаточны не очень высокие концентрации плазмы. Предложена модель, показывающая, что всплески напряжения в прикатодной области разряда вызываются микровзрывами в катодных пятнах, образованием струй плазмы и отбрасыванием объёмного заряда ионов вследствие резонансной перезарядки, а всплеск напряжения, производимый одним пятном, шунтируется другими функционирующими в этот момент катодными пятнами.

## О ВЛИЯНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ КАТОДНЫХ ПЯТЕН ВАКУУМНОЙ ДУГИ И ИХ НАПРАВЛЕННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

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

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий  
АНРУз, Ташкент, Узбекистан; [arustamov@ai.e.uz](mailto:arustamov@ai.e.uz)

Эффективность технологической реализации вакуумного дугового разряда целиком определяется возможностью управления перемещением катодными пятнами (КП) по рабочей поверхности. Исследование линий тока электрического поля в катодной ванне на перемещение КП осуществлялось в электрической ванне при отношении удельного сопротивления электролита к диаметру опорного электрода, имитирующего КП в реальных условиях. Установлено, что при асимметричном съеме тока относительно опорного электрода (КП) вблизи него происходит трансформация линий тока и эквипотенциальных линий. Со стороны токосъема плотность тока выше по сравнению с плотностью тока у тыльной кромки электрода. С увеличением удельного сопротивления электрической ванны и уменьшением диаметра электрода усиление электрического поля в области опорного электрода возрастает, увеличивается и превышение электрического поля у передней кромки опорного электрода по сравнению с тыльной стороной. С уменьшением диаметра опорного электрода и соотношения усиление электрического поля  $\mu$  и величина превышения градиента потенциала  $K$  возрастают. Аппроксимируя полученные результаты к реальным значениям величины  $\xi$ , получим, что усиление электрического поля в области катодного микропятна может достигать  $\sim 10^2$  раз, а превышение электрического поля на передней кромке пятна по отношению к тыльной - нескольких десятков раз.

Таким образом, проведенное экспериментальное моделирование электрических полей при различных значениях  $d_n$  и  $\rho_k$  и асимметричном расположении электродов, указывает на то, что преимущественное образование новых микропятен (перемещений) в направлении к точке съема тока с катода, обусловлено возникновением асимметрии электрического поля тока на катоде.

## ВАКУУМНО-ДУГОВАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий  
АНРУз, Ташкент, Узбекистан; [arustamov@iae.uz](mailto:arustamov@iae.uz)

В области воздействия катодных пятен вакуумной дуги происходит испарение материала и нагрев поверхности, приводящий к его структурным изменениям. Работа посвящена расчёту температурных полей в поверхностном слое по методу источников теории теплопроводности. Рассматривалась задача для квазизамкнутой трубы ширины  $l$  и радиусом  $r$  с нетеплоизолированными границами при некотором начальном распределении температуры:  $\frac{\partial T(M, \tau)}{\partial \tau} = a^2 \Delta T$  (1),  $M \in (D)$ ,  $\tau > 0$ ,  $T(M, 0) = 0$ ,  $M \in (D)$  (2),  $\Delta T$ - оператор Лапласа,  $a^2$  – коэффициент теплопроводности. Определение функции точечного источника задачи (1) и (2) определялось интегральным преобразованием Фурье

$$T(M, \tau) = \int_0^\tau \int_{(D)} G(M, M', \tau - 0) f(M' \theta) d\Omega_{M'} \cdot dQ \quad (3)$$

Эта функция есть решение неоднородного уравнения  $\frac{\partial T}{\partial \tau} = a^2 \Delta T + f(M' \tau)$  (4)

График  $\theta_2(\tau)$  построен в области, соответствующей  $x < 0$ , а  $\theta_1(\tau)$  -  $x > 0$ . (рис.1). Получены три зоны, ограниченные кривыми  $\theta_1(\tau)$ ,  $\theta_2(\tau)$ ,  $\tau = 0$ , ( $x = 0$ ). Зона I является зоной высоких температур, зона II – низких, зона III соответствует переднему фронту температурной волны, появляющемуся в момент  $\tau = 0$  в точке  $X=0$ . Из рис.2. видно, что в силу тепловой изоляции границ и отсутствия теплообмена с окружающей средой в точках, пройденных источником, устанавливается предельная температура равная  $-T_0/2$ .

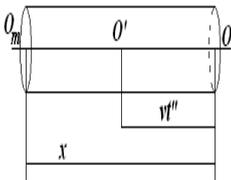


Рис.1.

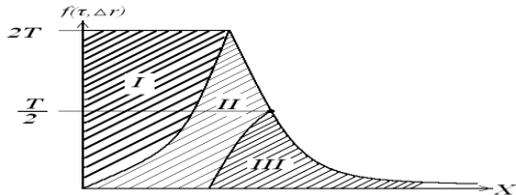


Рис.2.

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПОЛНОГО ТОКА ПОЛИ И МОНОКРИСТАЛЛОВ ОКСИДА ЦИНКА

Б.Г. Атабаев, У.Б. Шаропов, Р. Джаббарганов, М.К. Курбанов, Б.А. Зияев  
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, Ташкент, Узбекистан

На сегодняшний день оксид цинка (ширина запрещенной зоны  $E_g = 3.37$  эВ) является перспективным материалом для создания полупроводниковых лазеров и светодиодов в ультрафиолетовой области спектра.

Проведены сравнительные исследования на спектрометре полного тока (ПТ) и получены, спектры ПТ поли и монокристаллов ZnO. Из спектров ПТ можно сказать что, при энергиях электронов 3,5 эВ начинается возбуждение межзонных переходов для обоих образцов, который указывает на переход электронов из потенциального барьера в зону проводимости. Также наблюдается слабое формирование несколько пиков при энергиях возбуждения 10 эВ, 15 эВ, 20 эВ, но для их идентификации нужны дальнейшее исследования. Различие спектров ПТ двух образцов в том, что в поликристаллическом ZnO более слабо отражаются интенсивности пиков 4 и 8 эВ.

Анализ спектров ПТ двух кристаллов показывает что, в поликристаллическом образце интенсивность пиков очень слабая, за счет рассеяния электронов в поликристаллической решетке. Пик при энергии 8 эВ в спектре ПТ монокристаллического ZnO показывает наличие атомов цинка на границе раздела с поверхностью, что указывает на полярную ориентацию (0001) ZnO [1].

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Komolov S. A., // J. Phys. Cond. Matter. 1999. Vol. 11. P. 9581.

## ЭМИССИЯ И ФРАГМЕНТАЦИЯ КЛАСТЕРОВ ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ Nb, Ta И Ag ИОНАМИ SF<sub>5</sub><sup>+</sup> И ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

Н.Х. Джемилев, С.Ф. Коваленко, С.Е. Максимов, В.И. Тугушев, О.Ф. Тукфатуллин, Ш.Т. Хожиев  
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан

В последние годы исследования взаимодействия заряженных частиц с поверхностью направлены на выяснение закономерностей нелинейного увеличения распыления под действием молекулярных или кластерных ионов /1/. Однако, до настоящего времени не опубликованы данные о фрагментации метастабильных кластеров, распыленных полиатомными пучками. Нами исследовано влияние бомбардировки молекулярными ионами на эмиссию и распады распыленных кластеров металлов. Масс-спектры Nb<sub>n</sub><sup>+</sup> (n=1-15), Ag<sub>n</sub><sup>+</sup> (n=1-13) и Ta<sub>n</sub><sup>+</sup> (n=1-9) измерены по методике /2/ при бомбардировке поверхностей имеющими близкие массы ионами Хе<sup>+</sup> и SF<sub>5</sub><sup>+</sup> с энергией 8,5 кэВ. Найдено, что выходы кластеров Ag<sub>n</sub><sup>+</sup> при молекулярных SF<sub>5</sub><sup>+</sup> значительно увеличиваются по сравнению с Хе<sup>+</sup>, что связано с процессами их ионизации /3/. В то же время, усиление кластерного выхода при распылении Nb и Та ионами SF<sub>5</sub><sup>+</sup> по сравнению с Хе<sup>+</sup> не обнаружено. Сравнительные исследования мономолекулярной фрагментации кластеров Ag<sub>n</sub><sup>+</sup>, Nb<sub>n</sub><sup>+</sup> и Та<sub>n</sub><sup>+</sup>, полученных распылением одинаковыми по массам и различными по числу частиц ионами SF<sub>5</sub><sup>+</sup> и Хе<sup>+</sup>, показали, что возбуждение и фрагментация данных кластерных ионов в пределах точности измерений одинаковы. Сделан вывод о возможном влиянии при бомбардировке SF<sub>5</sub><sup>+</sup> распадов гетероядерных кластеров на формирование масс-спектров Nb<sub>n</sub><sup>+</sup> и Та<sub>n</sub><sup>+</sup>.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Wucher A. //Mat.Fys.Medd.Dan.Vid.Sel. 2006. V.52. P.405.
2. Джемилев Н.Х., Максимов С.Е., Коваленко С.Ф., Тугушев В.И. //XVI Межд. Конф. ВИП-2003, Т.1, С.367.
3. Ghalab S., Staudt C., Maksimov S.E., Mazarov P., Tugushev V.I., Dzhemilev N.Kh., Wucher A.. //NIM. 2002. V.B197. P.43.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ И МОНОМОЛЕКУЛЯРНОЙ  
ФРАГМЕНТАЦИИ КЛАСТЕРОВ  $\text{Si}_n\text{O}_m^+$  ПРИ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕН.Х. Джемилев, С.Ф. Коваленко, С.Е. Максимов,  
О.Ф. Тукфатуллин, Ш.Т. Хожиев

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

При бомбардировке поверхности кремния ионами  $\text{Xe}^+$  методом вторично-ионной масс-спектрометрии исследованы зависимости эмиссии и фрагментации по всем стехиометрически возможным каналам распыленных кластеров  $\text{Si}_n\text{O}_m^+$  от давления кислорода вблизи поверхности. Показано, что в этом случае наблюдается интенсивная эмиссия кластеров с различным числом атомов кремния и кислорода в своём составе, и изучено изменение выходов  $\text{Si}_n\text{O}_m^+$  в зависимости от давления кислорода. Исследованы каналы распада  $\text{Si}_n\text{O}_m^+$ , позволяющие определить основные структурные блоки, из которых состоят данные кластеры. Показано, что у положительных кластеров оксида кремния отсутствуют какие-либо характеризующие их каналы распадов, и для большинства  $\text{Si}_n\text{O}_m^+$  характерно наличие нескольких фрагментационных каналов. Во временных диапазонах  $\sim 10^{-6}$ - $10^{-5}$  с и  $\sim 10^{-5}$ - $10^{-4}$  с после эмиссии изучено изменение вероятности фрагментации  $\text{Si}_n\text{O}_m^+$  в зависимости от давления кислорода. На основании полученных данных сделан вывод, что с учётом взаимной обратимости реакций образования и мономолекулярной фрагментации распыленных кластеров, процесс образования  $\text{Si}_n\text{O}_m^+$  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.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Джемилев Н.Х. // Поверхность. 2012. №8. С.28-34.

## ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТИ CdTe, ИМПЛАНТИРОВАННОЙ ИОНАМИ АКТИВНЫХ МЕТАЛЛОВ

З.Э. Мухтаров, З.А. Исаханов, Б.Е. Умирзаков, Т. Кодиров,  
У.З. Исаханов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан. E-mail: isakhanov@aie.uz

В данной работе проведено исследование влияния низкоэнергетической ( $E_0=0,5-5$  кэВ) бомбардировки ионами  $Ag^+$  и  $Va^+$  на состав и электронную структуру приповерхностного слоя CdTe. Исследования проводились с использованием комплекса методов: ЭОС, ФЭС, ВИМС и ДБЭ. Профили распределения атомов по глубине определялись методом ЭОС в сочетании с послойным травлением ионами аргона, с  $E_0=2$  кэВ под углом  $5-10^0$  относительно поверхности образца. Перед исследованием пленки CdTe обезгаживались прогревом до  $T \approx 1100$ К в течение 3-4 часа при вакууме не хуже  $10^{-7}$  Па. Показано, что при бомбардировке пленок CdTe ионами  $Ag^+$  с  $E_0=1$  кэВ, при  $D \leq 10^{15}$  ион·см<sup>-2</sup> поверхность обогащается атомами Te, а в интервале доз  $D=10^{15}-5 \cdot 10^{16}$  ион·см<sup>-2</sup> – атомами Cd. При  $D=5 \cdot 10^{16}$  ион·см<sup>-2</sup> поверхностная концентрация атомов Cd и Te составляла  $\sim 75$  ат.% и 25 ат.% соответственно. Дальнейший рост дозы ионов не приводит к изменению состава поверхности.

В случае имплантации ионов  $Va^+$  в CdTe, наряду с разложением CdTe происходит внедрение этих ионов в приповерхностную область. При имплантации с дозой  $D \leq 5 \cdot 10^{15}$  ион·см<sup>-2</sup>, поверхность CdTe обогащается атомами Va и Te, а при  $D > 5 \cdot 10^{15}$  ион·см<sup>-2</sup> – атомами Va и Cd. Постимплантационный отжиг CdTe, имплантированный ионами  $Va^+$  с дозой насыщения ( $D=6 \cdot 10^{16}$  ион·см<sup>-2</sup>) приводит к формированию нанопитаксиальной пленки типа  $Cd_{0,5}Va_{0,5}Te$ . Показано, что плотность состояния валентных электронов и ширина запрещенной зоны нанопленки  $Cd_{0,5}Va_{0,5}Te$  зависит от толщины пленки. В частности  $E_g$  этой пленки при толщине  $d \approx 20$ Å составляла  $\sim 1,9$  эВ, а при  $d \geq 35-40$ Å – 1,7 эВ. В работе дается анализ полученных результатов.

## ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ НА СОСТАВ И СТРУКТУРУ СВОБОДНЫХ ПЛЕНОК Cu И СЛОИСТЫХ СТРУКТУР Si-Cu

З.Э. Мухтаров, А.С. Халматов, З.А. Исаханов, Б.Е. Умирзаков, М.К. Рузибаева  
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент,  
Узбекистан. E-mail: isakhanov@aie.uz

В данной работе изучено изменение состава и структуры поверхности свободных пленок Cu и Si-Cu при бомбардировке ионами  $\text{Na}^+$  с  $E_0=1$  кэВ разными дозами. Тонкие монокристаллические пленки меди получены методом вакуумного испарения на поверхности искусственно выращенного кристалла NaCl (100) при  $T=350-450$  К в вакууме не хуже  $10^{-7}$  торр. Пленка кремния напылялась на поверхность пленки Cu (100) методом распыления Si электронной бомбардировкой. Толщина пленки кремния варьировалась в пределах 50-500Å. Исследование проводилось методами ЭОС, СХПЭЭ и получением энергетических зависимостей ионов  $\text{Na}^+$ , прошедших через свободные пленки.

Результаты экспериментов показали, что при высоких дозах ионов ( $D \approx 5 \cdot 10^{16}$  ион·см<sup>-2</sup>) в приповерхностном слое толщиной 70-80Å образуется пленка, состоящая из механической смеси атомов Na+Cu. В этих слоях концентрация Na составляет 40-45 ат.%. При толщине  $d \geq 70-80\text{Å}$  с ростом глубины концентрация Na уменьшается и при  $d \approx 250-300\text{Å}$  концентрация ( $C_{\text{Na}}$ ) не превышает 1-2 ат.%. Прогрев системы до  $T=750$  К приводит к резкому изменению профили распределения атомов Na, однако образование интерметаллических соединений меди с натрием не наблюдалось.

При имплантации ионов  $\text{Na}^+$  в систему Si-Cu после прогрева образовались соединения типа NaSi и NaSi<sub>2</sub>. Как в случае свободных пленок Cu, так и в случае Si-Cu профили распределения атомов Na существенно отличаются от профилей, полученных для массивных образцов. В работе дается анализ полученных результатов.

## МЕТОД ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ СТРУКТУРНОГО СОВЕРШЕНСТВА ПОВЕРХНОСТИ НАНОКРИСТАЛЛОВ

С.Ж. Ниматов<sup>1)</sup>, Д.С. Руми<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> ИИПиЛТ АН РУз, Ташкент, Узбекистан

<sup>2)</sup> НТП “PROTON”, Ташкент, Узбекистан

Современное состояние микро- и нанoeлектроники выдвигает на первый план проблему контроля совершенства структуры поверхности субмонослойных пленок, растущих на поверхности монокристаллов. Широко используемые для этой цели дифракционные методы, в частности метод дифракции электронов низких энергий с измерением отношения рефлекс-фон (ДЭНЭ Р/Ф), дают лишь качественное представление о степени структурного совершенства поверхности.

В данной работе предлагается критерий, позволяющий корректно определить характерный размер областей на поверхности, в которых соблюдается дальний порядок, и оценить степень дефектности внутри этих областей. Площадь упорядоченных областей  $S_{уп.}$  может быть определена по угловой ширине рефлекса  $\Delta\Omega$ :

$$S_{уп} = \left( \lambda^2 / \Delta\Omega \right) \cdot \cos \phi,$$

где  $\lambda$  - длина волны электронов,  $\phi$  - полярный угол наклона рефлекса (угол дифракции). В качестве критерия совершенства поверхности можно выбрать совокупную, с точки зрения физико-химической неоднородности, величину  $P=D \cdot S$ , которая может быть выражена через отношение интенсивностей рефлекса и фона  $K=j_p/j_\phi$ :

$$P = \left( \frac{j_\phi \cdot \lambda^2 \cdot \cos \phi}{j_p \cdot \Delta\Omega \cdot S_0} + 1 \right)^{-1},$$

где  $S_0$  - площадь элементарной ячейки на поверхности. При этом энергия электронного пучка выбирается соответствующей минимальной длине пробега так, чтобы можно было ограничиться упругим отражением электронов от верхнего монослоя.

## НАБЛЮДЕНИЕ ДИФФУЗИИ МЕЖУЗЕЛЬНОГО Zn ИЗ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ZnO В Si ПОДЛОЖКУ

Р.А. Нусретов<sup>1)</sup>, Ш.У. Юлдашев<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup> Quantum-Functional Semiconductor Research Center, Dongguk University, Seoul, Korea

Нелегированные пленки ZnO обычно показывают n-тип проводимости благодаря присутствию природных дефектов. Измерения эффекта Холла на наиболее чистом коммерческом объемном ZnO [1] показывают существование мелких донорных уровней, одним из которых является межузельный Zn. Этот естественный мелкий донор является основным компенсатором при попытках создания пленок ZnO p-типа проводимости.

Наиболее удачные попытки создания нами p-типа проводимости ZnO были при нанесении его на сильнолегированные (как n-, так и p-типа) кремниевые подложки [2]. Что мы связывали с диффузией компенсирующей примеси (межузельного цинка) из пленок ZnO (толщины ~100нм) в “незалеченные” дефекты на поверхности кремниевых пластин.

Для подтверждения этого предположения, был снят профиль концентраций Zn тонкой пленки ZnO на сильнолегированной кремниевой подложке методом масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС) наших образцов в исследовательском центре JICA (Япония). Измерения выявили концентрацию Zn более  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  в приповерхностном слое Si до глубины в 100 нм.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Look D.C., Reynolds D.C., Sizelove J.R., Jones R.L., Litton C.W., Cantwell G. and Harsh W.C.// Electrical properties of bulk ZnO.// Solid State Commun. - 1998. V. 105(6). pp. 399-401.
2. Yuldashev Sh.U., Nusretov R.A., Khvan I.V., Panin G.N and Kang T.W. Electrical and optical properties of ZnO thin films grown on Si substrates // Journal of Applied Physics., 2006. - V.100. - pp. 013704\_1-4.

СИНЕРГЕТИКА КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОМ  
ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Б.Л. Оксенгендлер<sup>1)</sup>, Ф.Г. Джурабекова<sup>2)</sup>, С.Е. Максимов<sup>1)</sup>,  
Н.Ю. Тураев<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup> Helsinki Institute of Physics and Department of Physics, University of Helsinki, Helsinki, Finland

В последнее время появились данные об эффектах, трудно объяснимых в рамках стандартных идей радиационной физики твёрдого тела, среди которых авария космического корабля «Фобос-Грунт» из-за отказа интегральной схемы WS512K32V20G24M. В числе особенностей этого радиационного отказа следует выделить: 1) аномально быстрый первый отказ и 2) последовательность отказов и возвратов к работе вплоть до полного выхода прибора из строя. В /1/ нами была показана возможность объяснения этих особенностей в рамках синергетических процессов при сильной неравновесности в примесно-дефектной системе под действием высокоэнергичного облучения. В настоящей работе на основе математических методов синергетики:

- теории отображений, описывающей эволюцию числа определяющих дефектов  $n+1$  поколения через число дефектов  $n$  поколения;
- мастер-уравнения, позволяющего адекватно описать комбинаторную кинетику квазихимических реакций между дефектами и флуктуации их концентраций при приближении к бифуркации;
- представлений динамического хаоса о переходе «ламинарного» режима радиационного процесса в «турбулентный» и обратно,

изучена кинетика радиационных процессов и показано, что в облучаемом полупроводнике, возможно, реализовывался режим перемежаемости 1-го рода /2/, объясняющий указанные выше особенности отказа аппаратуры.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- 1) Oksengendler B.L., Maksimov S.E., Turaeva N.N., Djurabekova F.G. //Nucl.Instr.Meth.B.. 2014. V.45. P.326.
- 2) Шустер Г. Детерминированный хаос. Москва, «Мир», 1988, 240 с.

ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ СТРУКТУРА, СОЗДАННАЯ ИМПЛАНТАЦИЕЙ  
ИОНОВ P<sup>+</sup> И B<sup>+</sup> В Si(111)

А.С. Рысбаев, Ж.Б. Хужаниязов, И.Р. Бекпулатов,  
Р.Ф. Файзуллаев  
Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан

Одним из приоритетных направлений развития науки и техники является создание тонкоплёночных структур, обладающих высокой чувствительностью к различным внешним воздействиям. Особая чувствительность свойств полупроводниковых материалов к наличию незначительных примесей, температуре, давлению, воздействию электромагнитного излучения и т.д. широко используется при создании различных типов датчиков /1/. Однако существующие датчики температуры на основе Si способны измерять температуру объектов лишь до 350-380 К. Это связано с тем, что при указанных температурах происходит ионизация примесных атомов. Другим недостатком термоэлементов на основе Si является нелинейность их температурной характеристики.

С целью создания на основе кремния датчика температуры, способного измерять более высокие температуры, мы выбрали p-i-n – структуры.

Для получения p-i-n – структуры мы выбрали метод ионной имплантации, не подвергающий образец высокотемпературному прогреву. Выбором оптимальных режимов ионной имплантации и последующего отжига нами получен термодатчик, удовлетворяющий следующим требованиям /2/:

- 1) диапазон измеряемых температур: от 20 до 500 К. Во всем диапазоне зависимость  $U_{np}=f(T)$  – линейная;
- 2) температурная чувствительность составляет 2,1 мВ·К<sup>-1</sup>;
- 3) ток питания от 100 мкА до 1 мА.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Абдурахманов Б.М., Олимов Л.О. и др. // Гелиотехника, 1998. № 5. С. 78-83.
2. Юлдашев Ю.Ю., Рысбаев А.С., Хужаниязов Ж.Б., Рахимов А.М. // Патент РУз. № IAP 04779, 10.10.2013 г.

СПОСОБ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ  
МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

А.С. Рысбаев, Ж.Б. Хужаниязов, И.Р. Бекпулатов,  
Б.Э. Хайридинов  
Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан

Известны способы обработки поверхности образцов вне вакуума (*ex situ*), такие как механическая полировка, химическое травление, кипячение в органических растворителях, полоскание в деионизованной воде и т.д., и в вакууме (*in situ*), такие как: скол, прогрев, химическая обработка, ионное распыление. Скол в сверхвысоком вакууме является самым прямым способом получения свежей чистой поверхности кристалла. Однако он имеет ряд недостатков и в частности сколотая поверхность не гладкая и характеризуется высокой плотностью ступеней. Очистка поверхности кристаллов прогревом при температуре ниже температуры плавления образца приводит к перераспределению примесей в объеме образца или даже к их сегрегации на поверхность с последующим образованием очень прочных соединений. Ионное распыление, являясь эффективным методом очистки, разрушает структуру поверхности.

Целью работы является разработка новой дополнительной очистки (*in situ*) поверхности монокристаллов кремния Si(111). Поставленная задача решается созданием на поверхности Si(111) и Si(100) геттерирующего слоя путем имплантации ионов  $Va^+$  (или других щелочных элементов) с энергией  $E_0=0,5 - 1$ кэВ и с высокой дозой облучения  $D \approx 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$  в сверхвысоком вакууме при давлении остаточных газов  $10^{-7}$  Па. В результате чего в приповерхностной области кремния создается геттерирующий слой с высокой концентрацией в котором ~60% атомов Va или щелочных элементов являясь химически активными, образуют соединения с атомами кремния и неконтролируемых примесей и после прогрева при  $T=1300\text{K}$  в течении 60 – 120 секунд они испаряются из приповерхностной области Si(111), приводя к дополнительной очистке поверхности монокристалла Si.

СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГРАНИЦ РАЗДЕЛА Al/Si, Al/NaSi<sub>2</sub>

Д.А. Ташмухамедова, Б.Е. Умирзаков, С.Б. Донаев, Х.Х. Болтаев  
Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан

В данной работе изучен состав, электронная и кристаллическая структура границы раздела Al-Si и Al/(Na+Si). Пленки Al и Na создавались напылением их атомов на поверхность Si в условиях высокого вакуума ( $P \approx 10^{-5}$  Па). Исследования проводились с использованием методов ОЭС, УФЭС, РЭМ, ДБЭ и АСМ.

Атомы Al напылялись на поверхность Si (111) при комнатной температуре с толщиной  $\theta \approx 500$  Å. При этом на границе раздела Al-Si вследствие взаимодиффузии образовался переходный слой, состоящий из механической смеси Al + Si с толщиной  $\sim 100$  Å. После прогрева при  $T = 700$  К в течении 30 минут толщина слоя Al + Si доходила до  $\sim 600$  Å, часть атомов Al диффундировала вглубь кремния до  $1000 - 1200$  Å. Толщина поверхностного слоя чистого Al не превышала  $150 - 200$  Å. При этом наблюдалась частичная диффузия Si к поверхности Al. Полное перемешивание Al и Si наблюдалось при  $T \approx 800$  К. При этом толщина пленки Al+Si составляла  $\sim 800$  Å, а их концентрация в этом слое  $\sim 40$  ат.% и  $60$  ат.% соответственно. Аналогичные исследования проводились и для пленки Al напыленного на поверхность Si с пленкой Na с  $\theta \approx 200$  Å. На границе Na - Si при комнатной температуре образовались соединения типа NaSi и NaSi<sub>2</sub>, толщина которых лежит в пределах  $100$  Å. После прогрева при  $T \approx 700$  К практически все атомы Na образуют химические соединения с кремнием и формируются пленки силицида NaSi<sub>2</sub> с  $\theta \approx 300 - 350$  Å, с удельным сопротивлением  $30 - 40$  мкОм·см. Глубина максимальной диффузии Na, измеренная от границы NaSi<sub>2</sub> - Si, не превышала  $150 - 200$  Å. На поверхность этой пленки напылялись атомы Al с  $\theta \approx 500$  Å. При этом глубина диффузии Al в NaSi<sub>2</sub>/Si уменьшилась в  $8 - 10$  раз. В работе дается анализ полученных результатов.

## ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКИ НА СОСТАВ И СТРУКТУРУ ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ НА ГРАНИЦЕ НАНОПЛЕНОЧНОЙ СИСТЕМЫ TiN-Fe

Б.Е. Умирзаков, М.К. Рузибаева

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

В данной работе экспериментально и теоретически исследовались параметры переходного слоя пленка - подложка TiN -  $\alpha$ -Fe. Исследования показали, что ионная бомбардировка приводит к существенному увеличению взаимодиффузии атомов на границе TiN- $\alpha$ -Fe, следовательно, формируется трехкомпонентный переходный слой типа Ti-N-Fe. В частности, при толщине пленки TiN  $l=10 \text{ \AA}$  максимальный поток атомов Ti наблюдается при  $E=3 \text{ кэВ}$ , а атомов азота – при  $E=2 \text{ кэВ}$ , а атомов Fe в пленку TiN – при  $E=5 \text{ кэВ}$ . С увеличением толщины пленки более эффективны ионы с большей энергией. Эффективность перемешивания для данной энергии ионов зависит от толщины наращиваемой пленки.

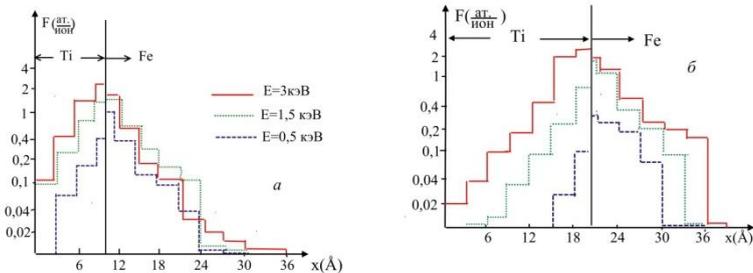


Рис.1 Распределение по толщине мишени числа атомов Ti, перешедших из пленки Ti в подложку  $\alpha$ -Fe и атомов Fe, перешедших в пленку.  $E=0,5; 1,5; 3 \text{ кэВ}$ , толщина пленки Ti  $10 \text{ \AA}$  (а) и  $20 \text{ \AA}$  (б).

На рис.1 представлены распределения атомов Ti, перешедших из пленки в подложку и атомов Fe, перешедших в пленку при напылении Ti с одновременной бомбардировкой этими же ионами ( $E=0,5, 1,5$  и  $3 \text{ кэВ}$ ). Видно, что в начале процесса конденсации более сильным эффектом перемешивания обладают низкоэнергетичные ионы. С увеличением толщины пленки более эффективны ионы с большей энергией.

## ШИРИНА ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ НАНОСТРУКТУР Si, СОЗДАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ SiO<sub>2</sub> ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКОЙ

Б.Е. Умирзаков, Ё.С. Эргашов, А.К. Ташатов,  
В.Х. Холмухамедова  
Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан

Исследование физических свойств наноразмерных пленок и кристаллов, а также многослойных структур на их основе в последние годы очень быстро развивается. Нами ранее получены наноразмерные структуры в поверхностной области Si, GaAs и SiO<sub>2</sub> методом низкоэнергетической ионной имплантации с последующим отжигом. В частности показано, что ширина запрещенной зоны нанокристаллов CoSi<sub>2</sub> и NaSi<sub>2</sub> при уменьшении их линейных размеров от 50 нм до 20 нм увеличивается на 0,3 эВ и составляет 0,9 эВ. Данная работа посвящена изучению ширины запрещенной зоны нанопленок и нанокристаллов Si, полученных бомбардировкой пленок SiO<sub>2</sub> ионами Ag<sup>+</sup>.

В таблице приведены оценочные значения E<sub>g</sub> для нанопленок и нанокристаллических фаз Si с различными линейными размерами (h – толщина наноструктур, d – поверхностный диаметр нанокристаллических фаз).

Таблица

Оценочные значения E<sub>g</sub> для нанопленок и нанокристаллических фаз Si

Параметр	Нанопленка h, Å				Нанокристалл (h = 30 – 35 Å), d, Å		
	10-12	20-25	30-35	50-60	100-120	300-350	450-500
E <sub>g</sub> , эВ	1,5	1,3	1,2	1,1	1,8	1,4	1,2

Видно, что в случае нанопленок квантово-размерные эффекты проявляются при h ≤ 25 – 30 Å, а в случае нанокристаллов с толщиной 30 – 35 Å при d ≤ 400 – 450 Å.

ЭМИССИОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ 

М.Б. Юсупджанова, Д.А. Ташмухамедова, Э. Раббимов,  
 М.А. Миржалилова  
 Ташкентский государственный технический университет,  
 Ташкент, Узбекистан

Нанопленочные структуры типа  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  имеют большие перспективы в создании современных электронных приборов на основе МДП и ПДП – структур. Однако получение однородных с хорошей морфологией и стехиометрией нанопленок  $\text{SiO}_2$  является трудной задачей. В данной работе изучены эмиссионные свойства пленок  $\text{SiO}_2$ , полученных двумя способами. Однородные пленки с толщиной  $\theta = 20 - 100 \text{ \AA}$  получены методом имплантации ионов  $\text{O}_2^+$  в Si в сочетании с прогревом, пленки с  $\theta = 100 - 500 \text{ \AA}$  – окислением кремния в парах сухого кислорода. Исследования проводились с использованием методов вторично- и фотоэлектронной спектроскопии. В таблице приведены значения фотоэлектронной работы выхода  $\Phi$ , коэффициента вторично-электронной эмиссии  $\sigma_m$ , ширины запрещенной зоны  $E_g$ , интенсивности оже-пика с  $E = 76 \text{ эВ}$   $\text{SiO}_2/\text{Si}$  разной толщины.

Таблица

Основные характеристики тонких оксидных пленок

Толщина пленки $\text{SiO}_2$	$\Phi$ , эВ	$E_g$ , эВ	$I_{\text{оже}}, E_{\text{оже}} = 76 \text{ эВ}$	$\sigma_m$
30	8,5	–	8	1,2
60	9	8	10	1,8
120	9	7,8	10	2,4
200	9,2	8,2	10	2,8
400	9,2	8,2	10	3,2
500	9,2	8,2	10	3,2

Из таблицы видно, что параметры зон, характерные для “толстой” пленки  $\text{SiO}_2$ , устанавливаются уже при толщине  $50 - 60 \text{ \AA}$ , а эмиссионные свойства – при  $\theta = 300 - 400 \text{ \AA}$ . В работе дается анализ полученных результатов.

## РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В КОМПОЗИТНЫХ ВТСП ПРОВОДНИКАХ

А.В. Троицкий<sup>1)</sup>, Г.Н. Михайлова<sup>1)</sup>, Т.Е. Демихов<sup>2)</sup>, Л.Х. Антонова<sup>1)</sup>,  
А.Ю. Дидык<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Москва, Россия

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

<sup>3)</sup>Лаборатория им. Г.Н.Флерова ОИЯИ, Дубна, Россия

Композитные ВТСП ленты 2 поколения на базе соединений  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  и  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  являются перспективными материалами для создания магнитных систем в установках физики высоких энергий /1/.

В работе изучалось воздействие облучения тяжелыми ионами высоких энергий ( $^{132}\text{Xe}^{27+}$  (167 МэВ),  $^{84}\text{Kr}^{17+}$  (107 МэВ),  $^{40}\text{Ar}^{8+}$  (48 МэВ)) и протонами с энергией 2,5 МэВ на критические параметры указанных ВТСП лент.

Экспериментально была определена радиационная стойкость ВТСП лент по изменению критического тока и критической температуры. Было обнаружено три эффекта при низких уровнях облучения ионами, а именно, увеличение критического тока, улучшение адгезии сверхпроводящего слоя с подложкой и уменьшение внутренних напряжений. При более высоких флюенсах вначале начинает падать критический ток, затем критическая температура, а еще при более высоких сверхпроводимость исчезает.

При облучении 2,5 МэВ протонами обнаружено, что  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  образцы имеют более высокую радиационную стойкость по сравнению с  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  – лентами.

Авторы благодарят С.В.Самойленкова за предоставление образцов  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. S. Kang, A. Goyal, J. Li, A.A. Gapud, P.M. Marlin, L. Heatherly, J.R. Tompson, D.K. Christen, F.A. List, M. Paranthaman, D.F. Lee // Science, 2006, Vol. 311, 1911.

ИОНОПУЧКОВЫЕ И РЕНТГЕНОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПСЕВДОЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ Au НА МУСКОВИТЕВ.К. Егоров<sup>1)</sup>, Е.В. Егоров<sup>1)</sup>, Ю.М. Миронов<sup>2)</sup><sup>1)</sup> ИИПТМ РАН, Черноголовка, Россия<sup>2)</sup> ООО «НТК МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва

Из минералогических исследований известно, что на грани (001) природных монокристаллов мусковита, характеризующегося монокристаллической структурой и элементным составом  $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ , часто наблюдаются ориентационно согласованные наросты других соединений, близких мусковиту по своим структурным особенностям. В то же время эксперименты показали, что в некоторых случаях наблюдается наличие частичного ориентационного соответствия между структурами мусковита и нанесенного на него тонкопленочного покрытия при отсутствии заметного подобия их структурных мотивов. То есть оказывается возможным получение псевдоэпитаксиальной структуры при отсутствии соразмерности параметров решетки материалов.

В работе ионопучковыми и рентгеновскими методами изучена псевдоэпитаксиальная структура Au (170 нм)/мусковит (001). Исследования показали, что подложка и пленка являются монокристаллическими образованиями, характеризуются существенным различием структурных мотивов, но для которых наблюдается ориентационное соответствие кристаллографического направления [001] мусковита и [111] пленки золота. Ориентационное соответствие по другим кристаллографическим направлениям отсутствует. Приведены экспериментальные данные, характеризующие эту псевдоэпитаксиальную структуру, и предложена рабочая модель взаимного согласования структур, существенно различающихся размерами параметров кристаллографических решеток.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЦИРКОНИИ И ЦИРКОНИЕВОМ СПЛАВЕ Э110

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

<sup>1)</sup> МАТИ – РГТУ им. К.Э. Циолковского, Москва, Россия

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

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

Плазменное воздействие в электролите на цирконий и его сплавы методом микродугового оксидирования (МДО) проводят с целью коррозионной защиты поверхности, получения керамических покрытий с теплозащитными и другими функциональными свойствами /1-3/. В работе приводятся результаты сравнительного исследования элементного состава морфологии и структуры МДО-покрытий на поверхности технически чистого циркония и сплава Zr-1% Nb (сплав Э110). МДО в течение 100 мин проводили в водном растворе гипофосфита натрия и силиката натрия при комнатной температуре. Состав и структуру покрытий исследовали с помощью методов спектроскопии ядерного обратного рассеяния протонов энергии 7.7 МэВ и рентгеновского структурного анализа, морфологию покрытий – с помощью растровой электронной микроскопии. Наряду с моноклинной фазой диоксида циркония МДО-покрытия толщиной около 200 мкм содержат оксиды кремния и других элементов электролита. Установлено значительное влияние ниобия в сплаве Zr-1% Nb на структуру МДО-покрытий и их рост при МДО. Оксидные покрытия на сплаве формируются на 30% более толстыми с развитым барьерным слоем. Обсуждаются возможности применения получаемых покрытий в качестве теплозащитных.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Борисов А.М., Востриков В.Г., Иванова С.В. и др. // Поверхность. 2013. №5. С.42.
2. Борисов А.М., Савушкина С.В., Виноградов А.В. и др.// Поверхность. 2014. №4. С. 37.
3. Legostaeva E.V., Kulyashova K.S., Komarova E.G. et al.// Mat.-wiss. u.Werkstofftech. 44 (2013) 188-197.

## ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ И ОТЖИГА НА СВОЙСТВА ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

А.В. Кабышев, Ф.В. Конусов  
НИТПУ, Томск, Россия

Ионно–термическая модификация меняет свойства диэлектриков вследствие накопления радиационных дефектов (РД), их кластеризации и формирования неупорядоченных твердых растворов /1/. Влияние РД, их кластеров на свойства зависит от способности внедренных элементов замещать атомы решетки. В работе исследовано оптические и электрические характеристики  $\text{Al}_2\text{O}_3$  после облучения ионами  $\text{Si}^{n+}$ ,  $\text{Al}^{n+}$ ,  $\text{C}^+$ ,  $\text{Cr}^{n+}$ ,  $\text{Fe}^{n+}$ ,  $\text{Co}^{n+}$ ,  $\text{Mo}^{n+}$  и  $\text{Ti}^{n+}$  (100 кэВ,  $\Phi=10^{15}\text{--}10^{17}\text{ см}^{-2}$ ) и последующего отжига ( $P=1\text{--}10^5$  Па,  $T=300\text{--}1800$  К). Наведенные в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  РД и наночастицы создают в запрещенной зоне непрерывный спектр локализованных состояний (ЛС), определяющих свойства /1/. Межзонное поглощение в лейкосапфире и в поликоре обусловлено накоплением ЛС дивакансий, кластеров собственных РД, дефектов замещения и примесно–вакансионных комплексов /1/. Корреляция между параметрами межзонного и экспоненциального поглощения, а также между оптическими и фотоэлектрическими характеристиками свидетельствует о формировании в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  нового сильно дефектного материала. Структура ЛС, наведенных различными несовершенствами, обладает различной стабильностью к отжигу в зависимости от вида имплантированных ионов. После отжига доминирует формирование или кластеров дефектов замещения (ионы  $\text{Cr}^{n+}$ ,  $\text{Fe}^{n+}$ ,  $\text{Co}^{n+}$ ,  $\text{Ti}^{n+}$ ) или собственных РД ( $\text{Si}^{n+}$ ,  $\text{Al}^{n+}$ ,  $\text{C}^+$ ), различающихся оптической и электрической активностью, а также образование комплексов из РД и внедренной примеси (ионы  $\text{C}^+$ ,  $\text{Fe}^{n+}$ ,  $\text{Mo}^{n+}$ ,  $\text{Ti}^{n+}$ ). Полного восстановления электронной структуры ЛС в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при отжиге до 1800 К не происходит.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Кабышев А.В., Конусов Ф.В. // J. Surf. Invest., 2010, V.4, No 2, P. 327.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА С ДЕФЕКТАМИ В  
ВОЛЬФРАМЕ МЕТОДОМ КЛАССИЧЕСКОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ  
ДИНАМИКИ

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

<sup>1)</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
(СПбГПУ), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2)</sup> Бельгийский центр ядерных исследований SCK•CEN, Мол, Бельгия

В работе изучено взаимодействие межузельного водорода (H) с дислокациями и точечными дефектами в вольфраме (W) с помощью численного моделирования в рамках метода классической молекулярной динамики. Рассмотрено две альтернативные модели для описания межатомных взаимодействий (H-H, H-W, W-W): метод погруженного атома EAM /1/ и модель насыщения связей BOR /2/. Проведено сравнение результатов расчетов с данными, полученными методами квантово-механического моделирования (*ab initio*). Недавно разработанный потенциал в рамках модели EAM /1/ продемонстрировал лучшее согласие с результатами *ab initio*, чем потенциал BOR /2/. Расчеты методом молекулярной статистики показали, что атомы водорода притягиваются к ядру дислокации, как в случае винтовой, так и в случае краевой дислокации. Моделирование диффузии водорода вблизи краевой дислокации методом классической молекулярной динамики продемонстрировало одномерную миграцию водорода вдоль ядра дислокации, подтверждая тем самым результаты статических расчетов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Bonny G., Grigorev P., Terentyev D. // Journal of Physics: Condensed Matter, 2014, V. 26(48), P. 485001.
2. Li X.-C. et al. // Journal of Nuclear Materials, 2012, V. 426(1–3), P. 31.

## RADIATION EFFECTS ANALYSIS OF CMOS DEVICES IN LEO ENVIRONMENT

Muhammad Sajid<sup>1</sup>, N.G. Chechenin<sup>2</sup>, Frank Sill Torres<sup>3</sup>, E.U. Khan<sup>4</sup>, Shahrukh Agha<sup>1</sup>, Adeel Shahzeb<sup>5</sup>

- <sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, COMSATS Institute of Information Technology (CIIT), Park road, Islamabad, Pakistan,  
<sup>2</sup> Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia,  
<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering, UFMG Brazil,  
<sup>4</sup> Department of Physics, CESET Islamabad Pakistan,  
<sup>5</sup> Satellite Research and Development Center SUPARCO Lahore  
Email: sajidikh@ gmail.com, franksill@ufmg.br , nchechenin@yandex.ru, ehsanukhan@ceset.pk, shahrukh\_gha@comsats.edu.pk

This paper concentrates on the impact of Low Earth Orbit (LEO) ionizing radiation environment on NMOS transistor fabricated in 65nm bulk CMOS technology node. The energy deposited by protons and heavy ions present in Earth radiation belts, Solar flares and Galactic Cosmic Rays was estimated which can result in degradation of device performance by the creation of electron-holes pairs. The impact of technology scaling on charge sharing, critical charge, SEU cross-section, I-V characteristic and SEU rate was determined. The estimated SEU rates were compared with the devices fabricated in 90nm, 45nm and 32nm. Finally, the impact of spot shielding of 100mils thickness on LET spectrum of transmitted particles was evaluated. In order to characterize the robustness of scaled nano-CMOS devices, state of the art simulation tools like visual TCAD/Genius, GSEAT/VisualParticle were utilized whereas LEO radiation environment was determined with the help of OMERE-Trad software.

ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ  $\text{SiO}_2$   
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРОМЕТРИИ ЯДЕРНОГО ОБРАТНОГО  
РАССЕЯНИЯ ПРОТОНОВ

Л.А. Борисенко <sup>1)</sup>, А.С. Орехов <sup>1)</sup>, А. И. Каменских <sup>2)</sup>,  
Н.В. Ткаченко <sup>2)</sup>, В.Г. Востриков <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> ФИАН им. П.Н.Лебедева РАН, Москва, Россия

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

Твердые вещества в виде аэрогелей имеют удельную плотность, значительно меньше плотности сплошного материала. Равномерно распределенная в пространстве трехмерная сетка внутренней структуры аэрогеля имеет элементы, близкие к наноразмерной области.

Для аэрогелей (в том числе – полимерных аэрогелей) характерна высокая степень однородности, что делает возможным исследование существенно докритической лазерной плазмы уже на начальных временах взаимодействия с лазерным излучением. На существующих высокоэнергетичных лазерных установках (например, с 1ой или 2ой гармониками неодимового лазера в пико- или наносекундном импульсе) достигаются стабильные докритические электронные концентрации при использовании твердотельной мишени. Однако благодаря малым плотностям «холодной» мишени, измерения проводятся не при разлете вещества, что приводит к сильным пространственным неоднородностям, а сразу после начала прогрева.

Актуальными являются разработки неразрушающих методов измерения параметров таких объектов на основе аэрогеля для исследования и контроля состава и структуры. В настоящей работе для анализа пористости и элементного состава образцов аэрогеля применен метод спектрометрии ядерного обратного рассеяния. Пористость вещества определена при помощи сравнения геометрической толщины, измеренной при помощи томографа, и массовой толщины, получаемой методом ЯОР.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ ПОЛИИМИДНЫХ ПЛЕНОК В ПОТОКАХ КИСЛОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ МЕТОДАМИ РОР И ЯОР

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

<sup>1)</sup> МАТИ-РГТУ имени К.Э.Циолковского, Москва, Россия

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

На наружных поверхностях космических аппаратов широко используются полимерные материалы. На низких околоземных орбитах значительные разрушения полимерных материалов и кардинальное ухудшение их функциональных характеристик вызывает атомарный кислород (АК) набегающего потока. Наблюдаются изменения топологии и химического состава поверхности. Актуальными являются исследования таких явлений как непосредственно на космических аппаратах, так и в лабораторных условиях. Исследования в реальном времени при долговременных полетах в силу длительности эксперимента в космическом пространстве затруднено, что приводит к необходимости имитационных испытаний ускоренного моделирования таких условий на Земле. Целью данной работы являлось установление изменения химического состава полиимидной пленки после облучения плазмой АК.

В работе методами РОР и ЯОР исследовали деградацию пленок полиимида ( $C_{22}H_{10}O_5N_2$ ) толщиной 50 мкм. Имитацию воздействия набегающего потока АК производили воздействием потоков кислородной плазмы, формируемых плазменным ускорителем. В ходе исследований установлено уменьшение массовой толщины пленки в полтора раза при незначительном изменении элементного состава полимерного материала.

## ЭЛЕКТРОННОЗОНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ФЕРРИТОВ

А.А. Вирюс<sup>1)</sup>, В.В. Коровушкин<sup>2), 3)</sup>, М.А. Степович<sup>3), 4)</sup>, М.Н. Шипко<sup>3), 5)</sup>,  
М.Н. Филиппов<sup>6)</sup>

- <sup>1)</sup> Институт экспериментальной минералогии РАН, г. Черноголовка, Россия  
<sup>2)</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
г. Москва, Россия  
<sup>3)</sup> Ивановский филиал Российского экономического университета  
им. Г.В. Плеханова, г. Иваново, Россия  
<sup>4)</sup> Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, г. Калуга,  
Россия  
<sup>5)</sup> Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,  
г. Иваново, Россия  
<sup>6)</sup> Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, г. Москва,  
Россия

Методами растровой электронной микроскопии проведены исследования влияния магнито-импульсной обработки на структуру поверхности и свойства ферритов-гранатов и шпинелей, в которых проявляется магнитоэлектрический эффект. Учет влияния локального магнитного поля на распределение вторичных электронов, возникающих при взаимодействии электронного зонда с магнитной мишенью, при изучении шлифов ферритов позволил провести качественную оценку влияния магнито-импульсной обработки (МИО) на величины локальных магнитных полей на поверхности мишеней. Экспериментально определены параметры МИО, обеспечивающие повышение эксплуатационных характеристик исследованных ферритов.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания (проект № 1416), а также Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Ивановской области (проект № 15-48-03210).

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРИИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ПРИ  
РАЗРАБОТКЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ  
МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ

А.М. Борисов<sup>1)</sup>, Б.В. Владимиров<sup>1)</sup>, В.Г. Востриков<sup>2)</sup>,  
А.И. Каменных<sup>2)</sup>, Б.Л. Крит<sup>1)</sup>, В.Г. Сухарев<sup>1)</sup>, Н.В. Ткаченко<sup>2)</sup>,  
А.В. Эпельфельд<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> МАТИ – РГТУ им. К.Э. Циолковского, Москва, Россия

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

Проблема биомедицинских сплавов на основе магния состоит не только в недостаточной их коррозионной стойкости в организме, но и неконтролируемом процессе их растворения. Для решения проблемы перспективным представляется метод микродугового оксидирования (МДО), благодаря которому возможно осуществлять синтез на поверхности изделий из магниевых сплавов оксидных слоев, обладающих высокой прочностью сцепления с основой и контролируемой коррозионно-защитной способностью /1/. Для исследования МДО-покрытий на магниевом сплаве в настоящей работе использовали методы спектрометрии резерфордского и ядерного обратного рассеяния. Полученные данные свидетельствуют о наличии в МДО-покрытиях сложной смеси оксидов металлов, входящих как в состав магниевое сплава, так и электролита. На рентгенограммах МДО-покрытия выявлены брэгговские отражения на кристаллах оксида магния MgO и природного минерала магния повышенной твердости, форстерита Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, - основных компонентов стеатитовой керамики. В работе обсуждаются также зависимости состава и структуры МДО-покрытий от параметров режимов микродугового оксидирования.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-12038/13 офи\_м.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. В 2-х томах. Том II. – М.: Техносфера, 2011. – 512 с.

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОТОКА АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА НА МАССИВЫ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Е.Н. Воронина, Л.С. Новиков, В.Н. Черник,  
Е.А. Воробьева, А.В. Макунин  
Научно-исследовательский институт ядерной физики  
имени Д.В. Скобельцына Московского государственного  
университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В докладе представлены результаты облучения потоком кислородной плазмы с энергией частиц  $\sim 20$  эВ массивов вертикально ориентированных многослойных углеродных нанотрубок (УНТ) с диаметром 20–100 нм, синтезированных методом пиролитического газофазного осаждения /1/. Облучение производилось на магнито-плазодинамическом ускорителе НИИЯФ МГУ при флюенсах атомов и ионов кислорода  $10^{19} - 5 \cdot 10^{20}$  см $^{-2}$ .

Приведены результаты анализа экспериментальных данных и обсуждаются возможные механизмы повреждения УНТ потоком атомарного кислорода. Выполнено сравнение экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования процессов взаимодействия сверхтепловых атомов с УНТ различного диаметра /2–3/.

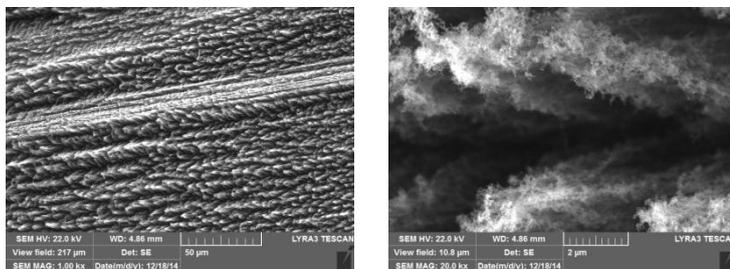


Рис. 1. Массив УНТ после облучения кислородной плазмой.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Chechenin N.G., Chernykh P.N., Vorobyeva E.A., Timofeev O.S. // Appl. Surf. Science, 2013, 275, 217.
2. Voronina E.N., Novikov L.S., Chernik V.N., et al. // Inorg. Mat.: Appl. Res. 2012, 3, 95.
3. Voronina E.N., Novikov L.S. // RSC Adv., 2013, 3 (35), 15362.

## СОСТОЯНИЯ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ, ВЫЯВЛЕННЫЕ МЕТОДОМ ЭМИССИОННОЙ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ

Т.В. Якуткина, Н.В. Волков, Р.А. Валиков, А.С. Яшин,  
Сысоева Н.В., Олейников И.В.

НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

Определение состояния оксидной пленки на поверхности металла является важной задачей во многих отраслях науки и техники. Одним из перспективных методов исследования поверхности металла является эмиссионная ИК-спектроскопия. ИК-спектры химических соединений отличаются большой индивидуальностью, что позволяет получить информацию не только о наличии элемента, но и определить его молекулярное состояние.

В данной работе методом эмиссионной ИК-спектроскопии изучено состояние ионно-модифицированных оксидных пленок на поверхности различных материалов: Si, Zr, Be. Спектры снимались на фурье-спектрометре Nicolet фирмы Termotech (спектральный диапазон составляет  $4000 - 400 \text{ см}^{-1}$  с разрешением до  $0,09 \text{ см}^{-1}$ , скорость сканирования до  $75 \text{ скан/с}$ ). С помощью разработанного алгоритма обработки ИК-спектров на основе табличного процессора EXCEL-2013 выявлены особенности состояния оксидных пленок после ионной обработки и легирования методом ионного перемешивания.

Показано, что в результате внедрения атомов Al, Be в оксиде формируется однородная пленка, содержащая незначительное количество пор (менее 3% объема). В результате облучения пучком ионов с широким энергетическим спектром общее содержание молекул воды после автоклавных испытаний снижается количество резонансных линий гидроксильных групп. Установлено, что смещение линий нормальных колебаний оксидов Be-O, Al-O в высокочастотную область свидетельствуют о наличии в оксидной пленке внутренних сжимающих механических напряжений, характерных для защитных оксидных пленок

## RBS AND EDS INVESTIGATION OF DEPOSITION CONTENT IN CNT-BASED FILTERS FOR LIQUID SOLUTIONS

E.M.I. Elsehly<sup>1),2)</sup>, N.G. Chechenin<sup>1)</sup>, K.A. Bukunov<sup>1)</sup>,  
A.V. Makunin<sup>1)</sup>, A.B. Priselkova<sup>1)</sup>, E.A. Vorobyeva<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

Carbon nanotubes (CNTs) became a focus of attention of many scientists and companies worldwide. The small dimensions, strength and the remarkable physical properties of these structures make them a unique material with a whole range of promising applications. CNT-based filters have a prospective advantage in comparison to the commercial filters already in operation because they are lightweight, do not use any chemicals, and do not require electricity or heat to operate. In the report we give an overview of the use of CNT-based filters as adsorbent for metal ions in liquid solutions like manganese. Different types of multiwall CNTs (MWNTs), both, commercial and grown in our laboratory, were used to prepare the samples of filters. In particular, large arrays of vertically aligned CNT (VANTs) were fabricated by a continuous spray pyrolysis method by using cyclohexane as a carbon source and ferrocene as a catalyst source. To estimate the efficiency of filtration, different parameters were measured, such as conductivity of solution, pH, contact time, optical measurements. Also the samples of CNT-filters after filtration process (with graphite as a substrate) were characterized by RBS and EDS techniques to investigate the deposition content in the filter. It was found that CNT-based filters are efficient for the adsorption of heavy metals from aqueous solution.

## DETERMINATION OF THE NaI (TI) DETECTOR EFFICIENCY USING RADIOACTIVE PARALLELEPIPED SOURCES

Mohamed S. Badawi<sup>1)</sup>, Mona M. Gouda<sup>1)</sup>, Ahmed M. El-Khatib<sup>1)</sup>, Mohamed A. Elzaher<sup>2)</sup>, Abouzeid A. Thabet<sup>3)</sup>, Ahmed A. Salim<sup>1)</sup> and Mahmoud I. Abbas<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Physics Department, Faculty of Science, Alexandria University, 21511 Alexandria, Egypt,

<sup>2)</sup> Department of Basic and Applied Sciences, Faculty of Engineering, Arab Academy for Science, Technology and Maritime Transport, Alexandria, Egypt,

<sup>3)</sup> Department of Medical Equipment Technology, Faculty of Allied Medical Sciences, Pharos University in Alexandria, Egypt

The efficiency transfer technique is considered as a straightforward mathematical method to calculate the full-energy peak efficiency of 3''×3'' NaI (TI) scintillation detector over a wide energy range. The calculations were based on calculating the effective solid angle ratio between the detector surface and the parallelepiped sources located at various distances from detector surface. Moreover, the reduction of the photon by the source-detector structure [detector material, detector end cap and holder material] was considered and determined. This method is basically useful in setting up the efficiency calibration curve for NaI (TI) scintillation detector when there is no calibration sources exist in dimensions form. The values of the efficiency calculations using mathematical method were compared with the measured ones and the results in general show good agreements.

## VARIATION OF HEMATOLOGICAL PARAMETERS IN RATS EXPOSED TO ELECTROMAGNETIC RADIATION

Sahar E. Abo-Neima<sup>1)</sup>, Karolin Abdel-Aziz Barakat<sup>1)</sup>, Hassan Tourk<sup>1)</sup>, Marzoga F.Ragab<sup>3)</sup> and Hussein A. Motaweh<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Physics, Faculty of Science,  
Damanhour University, Egypt

<sup>2)</sup>Department of Zoology, Faculty of Science,  
Damanhour University, Egypt

<sup>3)</sup>Department of Physics, Faculty of Science,  
Omar El-Moktar University, Elgouba Lebya

**Objective:** To investigate the effects of electromagnetic radiations on some hematological parameters of male white rats.

**Methods:** Fifty male albino rats were equally divided into three groups namely A, B, and C. Animals of group A used as control group which didn't receive any treatment. Animals of group B was divided into two subgroups namely B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub> which were discretely exposed to 50Hz, 3KV/m electric field (EF) for a period of 15 day (8 hours/day, 5day/week). Group B<sub>2</sub> animals were left to survive and housed at normal environmental conditions similar to control group A for a period of 15 day post exposed. Animals of group C are divided into two subgroups namely C<sub>1</sub> and C<sub>2</sub> were discretely exposed to the EF for a period of 30 day (8 hours/day, 5day/week). Group C<sub>2</sub> animals were left to survive and housed at normal environmental conditions similar to control group A for a period of 15 day post exposed. At the end of this period, blood samples were collected from all groups for investigation hematological parameters.

**Result:** showed that exposure to electromagnetic radiations originated different metabolic and hematological disruption, which appeared to be related to the duration of exposure, the treatment to EF caused a changes in hemoglobin concentration (Hb), white blood cells (WBCs), red blood cells (RBCs) count as compared to control group. Values of RBCs, WBCs are decreased with increasing exposure time and there is no improvement in hematological parameters for recovery groups post exposed. This means that these components of blood are broken due to irradiated by EF from technological devices which used daily and there is a significant effect in hemoglobin molecule structure due to damage/or broken, also the exposure induced changes in Eosinophile, Hb ,Paced Cell Volume(PCV)Mean Corpuscular Volume(MCV) and Mean Corpuscular Hemoglobin Concentration (MCHC) levels .

**Conclusion:** Exposure to electromagnetic radiations is responsible for the variations of some hematological parameters in rats.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ОРИЕНТИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК МЕТОДОМ RBS И EDS

К.А. Букунов, А.А. Шемухин, А.В. Макунин, Е.А. Воробьева, Н.Г. Чеченин  
НИИЯФ МГУ, Россия

Массивы вертикально ориентированных многостенных нанотрубок (ВОНТ), выращенных методом пиролиза с непрерывно подаваемого в реактор катализатора в виде раствора ферроцена в гексохлоране, исследовались на состав методами резерфордовского обратного рассеяния (РОР) и энергодисперсионного анализа характеристического рентгеновского излучения, возбуждаемого электронным пучком сканирующего электронного микроскопа. Как и ожидалось в спектре, помимо углерода, присутствовали атомы железа и кислорода. В спектре также присутствует кремний. Пластины кремния служили подложкой, но подложка удалялась при анализе образцов. Результаты спектрометрии сопоставляются с данными комбинационного рассеяния света (КРС) и обсуждаются с точки зрения природы дефектов в ВОНТ, обнаруживаемых методом КРС, и с точки зрения механизмов роста ВОУНТ

ФОРМИРОВАНИЕ NV-ЦЕНТРОВ В АЛМАЗЕ, ИМПЛАНТИРОВАННОМ  
ВОДОРОДОМ, С ОБЪЕМНЫМ И ТОНКОСЛОЙНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ  
АЗОТОМ

В.П. Попов<sup>1)</sup> В.А. Антонов<sup>1)</sup>, Л.Н. Сафронов<sup>1)</sup>, С.Н. Подлесный<sup>1)</sup>, И.Н. Курьянов<sup>2)</sup>, Ю.Н. Пальянов<sup>2)</sup>,

<sup>1)</sup>Институт физики полупроводников им А.В. Ржанова,

<sup>2)</sup>Институт геологии и минералогии им В.С. Соболева, Новосибирск, Россия

Алмазные наноструктуры, содержащие центры окраски из замещающего атома азота N и вакансии V в соседнем узле решетки, перспективны для спиновых кубитов квантовой информатики (КИ) при комнатной температуре. Традиционный способ их формирования основан на генерации вакансий в кристаллах алмаза типа Ib с замещающей примесью азота при облучении электронами с энергией в несколько МэВ и последующим отжигом в интервале температур 750-1150°C. Однако для формирования NV-центров в локальных областях кристалла такие частицы непригодны из-за малого сечения образования пар Френкеля и пробега в несколько сантиметров.

В наших экспериментах (111) пластины алмазов типа Ia и Ib отжигались при высоких P-T параметрах (1200-1600°C, 3-7 ГПа) после имплантации водорода H<sub>2</sub><sup>+</sup> с энергией 25 - 50 кэВ флюенсами  $\Phi = 1 \times 10^{13} - 3 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  и имплантации азота N<sup>+</sup> в пластины типа Ia с энергией 200 кэВ при повышенной температуре 450°C во избежание графитизации и блистеринга.

Измерениями ХТЕМ, КРС, и фотолюминесценции показано, что времена релаксации и декогерентизации спинов NV-центров не отличаются от объемных образцов с аналогичным содержанием узловых атомов азота. Подобные наноструктуры востребованы для создания микрорезонаторов и кубитов КИ технологий.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПЛЕНОК, НАПЫЛЕННЫХ  
НА УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС**

А.А. Ерискин<sup>1)</sup>, Г.Г. Бондаренко<sup>1)</sup>, В.Н. Колокольцев<sup>2)</sup>, В.С. Куликаускас<sup>3)</sup>, П.В. Силин<sup>4)</sup>, В.Я. Никулин<sup>4)</sup>

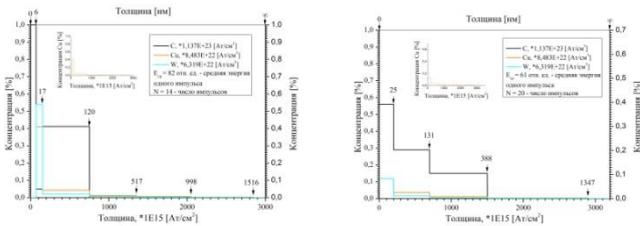
<sup>1)</sup>Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”,  
Москва, Россия

<sup>2)</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН, Москва,  
Россия

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

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

Методом обратного резерфордского рассеяния ионов  $\text{He}^+$  энергии 2 МэВ изучены профили распределения С, Си и W в пленках, напыленных на установке ПФ-4, ФИАН. Пленки напылялись на стеклянные подложки в газах Ar, D<sub>2</sub>. Установлено, что профили распределения элементов существенно зависят от кинетической энергии частиц и их размеров. При скоростях частиц ~100 км/с частицы проникают на глубину ~500 нм. Профили носят негомогенный характер. Для каждой примеси существуют определенные глубины залегания слоев под поверхностью стекла. На рис.1 приведены спектры распределения элементов: С, Си и W в стекле.



а б  
Рис.1. Спектры распределения элементов: С, Си и W в стекле. а) Образец 15-3, E=82, N=14; б) Образец 22-3, E=61, N=20

Особенностью получаемых пленок является расположение слоев примесей под поверхностью стеклянной подложки и их взаимное перекрытие. Такое расположение напыленных слоев существенно отличается от традиционно используемых методов нанесения пленок.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 15-02-05995.

Тезисы докладов XLV 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,  
П. Похил., В.С. Черныш, Н. Чеченин

Редактор А.И. Пчелко