

Тема: **4.2. Взаимодействие ионов с веществом.**

Номер госрегистрации: **01.9.80004292**

Приоритетное направление НИР НИИЯФ: **4. Взаимодействие излучений с веществом.**

ПН РФ: **Индустрия наносистем и материалов (03)**

КТ РФ: **Нанотехнологии и наноматериалы (07), Технологии атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом (08)**

1. WEB-сайт: www.danp.sinp.msu.ru

логотип: в разработке

2. **Основное содержание работ:** Теоретическое и экспериментальное исследование физики взаимодействия ионов с поверхностью и приповерхностными слоями твердых тел, потерь энергии ионов, ионизации и передачи зарядов в ион-атомных столкновениях, ядерно-физические, релаксационные процессы, процессы дефектообразования в твердых телах, ионно-пучковая модификация физических свойств материалов, развитие ионно-пучковых и ядерно-физических методов диагностики структуры и состава приповерхностных слоев и многослойных систем, при взаимодействии ионов с веществом.

3. **Руководители:**

Чеченин Н. Г., д.ф.-м.н., зав. ОФАЯ, (<http://danp.sinp.msu.ru>), (<http://www.sinp.msu.ru/structinc/opeople/chechenin.html>),

тел.(495) 939-2348, факс:(495) 939-08-96, e-mail: chechenin@sinp.msu.ru,

Тулинов А.Ф., д. ф.-м.н., профессор, (<http://danp.sinp.msu.ru>),

тел.(495) 939-2486, факс:(495) 939-08-96

Теплова Я.А., к.ф.-м.н., зав. ЛАС, тел.(495)939-4903, факс:(495)939-08-96, e-mail: teplova@anna19.sinp.msu.ru, (<http://danp.sinp.msu.ru>)

тел.(495)939-4903, факс:(495)939-08-96,

e-mail: teplova@anna19.sinp.msu.ru,

4. **Основные исполнители:**

Чеченин Н.Г., зав. ОФАЯ, дфмн, тел.(495)939-2348, факс:(495)939-0896

e-mail: chechenin@sinp.msu.ru,

Тулинов А.Ф., д. ф.-м.н., проф., тел.(495) 939-2346, факс:(495) 939-08-96

(<http://danp.sinp.msu.ru>),

Теплова Я.А., к.ф.-м.н., зав. ЛАС, тел.(495)939-4903, факс:(495)939-08-96, e-mail: teplova@anna19.sinp.msu.ru (<http://danp.sinp.msu.ru>),

Куликаускас В.С., зав. ЛВИВ, кфмн, тел.(495)939-5554, факс:(495)939-0896, email: vaclav@anna19.sinp.msu.ru,

Черныш В.С., зав. ЛИИТ, дфмн, проф., тел.(495)939-3770, факс:(495)939-0896 e-mail: chernysh@phys.msu.ru

Кабачник Н.М., внс, дфмн, проф.,

тел. (495) 939 36 05, факс:(495)939-0896, e-mail: kabach@anna19.sinp.msu.ru

<http://www.sinp.msu.ru/structinc/opeople/kabachnik.html>

Машкова Е.С., внс, дфмн, проф., тел. (495)939-4167, факс:(495)939-0896,
e-mail: es_mashkova@mail.ru
<http://www.sinp.msu.ru/structinc/opeople/mashkova.html>

Похил Г.П., внс, кфмн, тел. (495) 939 36 05, факс:(495)939-0896,
e-mail: Pokhil@anna19.sinp.msu.ru,

Борисов А.М., внс, дфмн, профессор,
тел. (495)939-4167, факс:(495)939-0896, e-mail: anatoly_borisov@mail.ru

Шульга В.И., внс, дфмн, тел. (495)939-3562, факс:(495)939-0896,
e-mail: shulga@anna19.sinp.msu.ru.

Балашова Л.Л., снс, кфмн, тел. (495)939-2509, факс:(495)939-0896,
e-mail: balash@anna19.sinp.msu.ru.

Бедняков А.А., снс, кфмн, тел. (495)939-4836, факс:(495)939-0896,
Белкова Ю.А., нс, кфмн, тел. (495)939-4903, факс:(495)939-0896,
Дмитриев И.С., снс, кфмн, тел. (495)939-4903, факс:(495)939-0896,
Затекин В.В., снс, кфмн, тел. (495)939-2480, факс:(495)939-0896,
e-mail: vyz@anna19.sinp.msu.ru.

Макунин А.В., снс, кфмн, тел. (495)939-4836, факс:(495)939-0896,
e-mail: makunin@anna19.sinp.msu.ru.

Новиков Н.В., снс, кфмн, тел. (495)939-2486, факс:(495)939-0896,
e-mail: novikov@anna19.sinp.msu.ru.

Патракеев А.С., снс, кфмн, тел. (495)939-3770, факс:(495)939-0896,
e-mail: patran@phys.msu.ru,

Петухов В.П., снс, кфмн, тел. (495)939-2147, факс:(495)939-0896,
e-mail: petukhov@anna19.sinp.msu.ru.

Чувильская Т.В., кфмн, тел. (495)939-2313, факс:(495)939-0896,
e-mail: tatchuv@anna19.sinp.msu.ru

Чуманов В.Я., снс, тел. (495)939-3605, факс:(495)939-0896,
e-mail: chu@anna19.sinp.msu.ru.

Широкова А.А., нс, кфмн, тел. (495)939-4836, факс:(495)939-0896,
e-mail: alla@anna19.sinp.msu.ru.

Черных П.Н., нс, кфмн, тел. (495)939-3307, факс:(495)939-0896,
e-mail: chernykh-pavel@yandex.ru,

Андрианова Н.Н., мнс, кфмн, тел. (495)939-4167, факс:(495)939-0896,
e-mail: andrianova_nn@mail.ru

Файнберг Ю.А., гл. инженер, тел. (495)939-4903, факс:(495)939-0896,
Ермаков Ю.А., вед. технолог, тел. (495)939-3770, факс:(495)939-0896,
e-mail: yuerm@anna19.sinp.msu.ru

5. Основные результаты

Из Энциклопедии

Основные результаты за достаточно протяженное время с кратким введением в историю их получения описаны в сборнике [1]. Поэтому в данном тексте будут приведены результаты только последних лет, которые характеризуют направление работ в настоящее время.

Исследование неупругих и упругих столкновений быстрых ионов в различных средах [2-7]

Полученные в ЛАС ранее экспериментальные на основе полученных ранее экспериментальных результатов рассчитаны потери энергии, вызванные взаимодействием с электронами мишени, а также потери энергии, связанные с перезарядкой. Расчеты проводились для быстрых легких ионов (p, He, Be, B, N, O) с энергией 0.35 МэВ/нуклон, прошедших через газообразные (азот, воздух) и твердые (целлулоид) мишени, а также для протонов с энергией 100-500 кэВ в азоте и алюминии. Показано, что потери энергии, связанные с перезарядкой, дают наибольший вклад (до 50%) в торможение протонов в области максимума потери энергии (100-200 кэВ). Значительная доля вклада перезарядки (до 40%) характерна для ионов Be при энергии ионов 0.35 МэВ/нукл. При увеличении

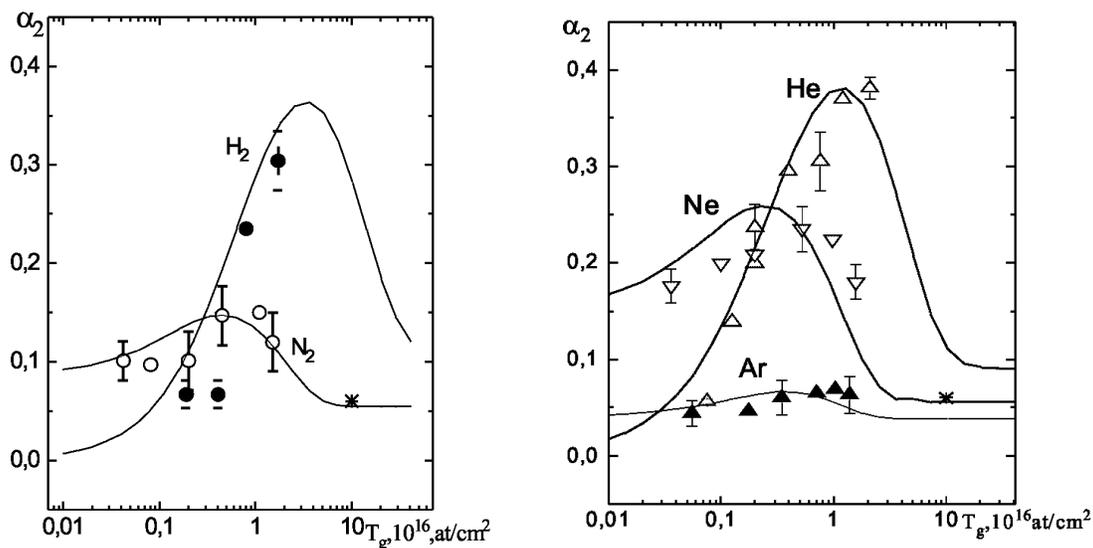


Рис.1 Зависимость α_2 от толщины мишени T_g для ионов бора при скорости $V=3,65a.e.$ Эксперимент: (●)- в водороде H_2 , (○)- в азоте N_2 , (*) - в целлулоиде, (Δ)- в гелии (He), (∇)- в неоне (Ne), (▲)-в аргоне (Ar), (*) - в целлулоиде. Расчеты – сплошные линии.

энергии ионов доля потери энергии за счет перезарядки уменьшается [2].

Исследовалось образование Li-подобных ионов бора и азота в метастабильном $4P_{5/2}$ состоянии в результате захвата одного и двух электронов He- и H-подобными ионами в газовых средах. Установлена

зависимость (рис.1) механизма захвата двух электронов от наличия в атоме среды электронов с параллельными спинами.

Рассчитаны энергетические потери и зарядовые распределения для ионов, находящихся в основном и метастабильном состояниях, с атомными номерами $Z=3-7$ и скоростью 3.65 а.е. в азоте. Показано, что наличие в ионных пучках метастабильных частиц приводит к увеличению среднего заряда и потерь энергии.

На основе экспериментальных данных о зарядовых распределениях ионов получены сечения потери и захвата электрона ионами углерода с начальными зарядами $i=0-6$ и скоростями $2.7-8 \times 10^8$ см/с в газах (He, N₂, Ar). Вычислено сечение потери электрона быстрыми ионами В, N, Ne в столкновениях с атомами гелия. Проведена систематизация экспериментальных сечений потери и захвата электронов и создан банк данных.

Распыление и другие эффекты при взаимодействии кэВ-ных ионов с поверхностью твердых тел.

Исследованы угловые распределения атомов при распылении никель-палладиевых сплавов с различной концентрацией компонент (Ni₅Pd, NiPd, NiPd₅). Установлено, что в никель-палладиевых сплавах на поверхность мишени сегрегирует элемент с более низкой объемной концентрацией. Хорошее согласие расчетных угловых распределений относительного выхода компонент с экспериментом было получено при концентрации сегрегирующих атомов Ni 2–3 % для сплава NiPd₅ и при концентрации сегрегирующих атомов Pd примерно 10 % для сплава Ni₅Pd.

Экспериментально и методом компьютерного моделирования проведено исследование влияния поверхностной сегрегации атомов на распыление Ni-Pd сплавов ионами Ag с энергией 3-10 кэВ. Из сравнения с экспериментом определена равновесная концентрация атомов в первом монослое мишени. Проведена серия расчетов по распылению сплава CuPt ионами Ag с энергией 1–320 кэВ. Показано, что особенность распыления этого сплава, наблюдавшаяся ранее экспериментально, связана с перестройкой поверхности в области максимальных значений коэффициента распыления.

При распылении высокоориентированного пирографита ионами N₂⁺, Ar⁺ с энергиями в десятки кэВ было установлено, что характер поведения угловых зависимостей коэффициента распыления Y при комнатных и повышенных температурах облучения существенно различен. При комнатной температуре (RT) в исследованном интервале углов падения найдена зависимость, типичная для столкновительного распыления неупорядоченных сред: $Y \sim 1/\cos\theta$. Зависимость $Y(\theta)$ при температуре 400°C является немонотонной и проявляет два минимума: при нормальном падении ($\theta = 0^\circ$) и $\theta = 60^\circ$.

Исследованы температурные ($-200^{\circ}\text{C} < T \leq 0^{\circ}\text{C}$) зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии γ и структура измененных поверхностных слоев стеклоглеродов с температурой исходной термообработки 850, 1000, 1300, 2000 и 2500 $^{\circ}\text{C}$ при высокодозном облучении при нормальном падении ионами Ar^+ энергии 30 кэВ. Для высокотемпературных стеклоглеродов был найден ступенчатый рост выхода электронов при некоторой температуре отжига T_a , аналогично наблюдаемому ранее нами для полигранулярных графитов и высокоориентированного пирографита. Для низкотемпературных стеклоглеродов γ монотонно растет с ростом температуры, при которой производится облучение. Температура термообработки, разделяющая два типа температурных зависимостей $\gamma(T)$ – монотонную и ступенчатую при облучении ионами Ar^+ выше, чем, как было показано ранее при облучении ионами N_2^+ при прочих равных условиях. Для низкотемпературных стеклоглеродов, облученных при температурах, близких к комнатной, картины дифракции близки к соответствующим картинам для исходных образцов. При повышенных температурах, как и для высокотемпературных стеклоглеродов наблюдается система трех колец.

Наличие двух типов зависимостей $\gamma(T)$ связывается с различными типами фуллереноподобных структур у низко- и высокотемпературных стеклоглеродов.

В исследованиях проявлений анизотропии углеродных материалов на распыление и ионно-электронную эмиссию, структуру и морфологию поверхностного слоя при высоких ($\sim 10^{19}$ ион/см 2) флюенсах ионного (30 кэВ N_2^+ , Ar^+) облучения выявлено, что ионно-индуцированный рельеф базовой грани высокоориентированного пиролитического графита марки УПВ-1Т может контролироваться анизотропными диффузионными процессами, приводящими к квазипериодическим поверхностным наноструктурам. Формирующаяся при этом морфология поверхности приводит к устойчивому по длительности

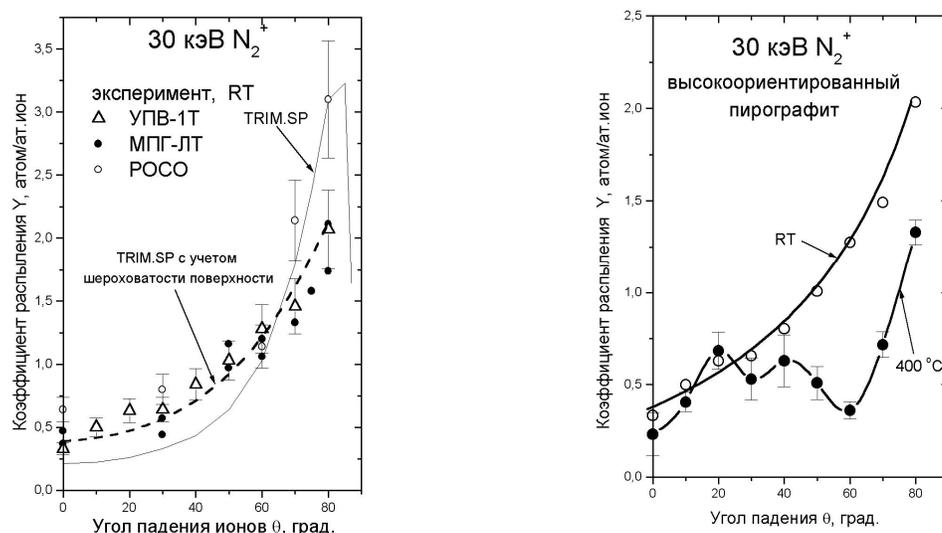


Рис.2. Угловые зависимости коэффициента распыления высокоориентированного пирографита марки УПВ-1Т при облучении ионами N_2^+ энергии 30 кэВ

облучения 2-3 кратному подавлению распыления по сравнению с другими углеродными материалами.

Выявлены ионно-индуцированные структурно-морфологические изменения в поверхностном слое однонаправленного углерод-углеродного композиционного материала марки КУП-ВМ. Найдено, что ионное облучение приводит к потере анизотропии структуры поверхностного слоя композита: аморфизации при комнатной температуре либо рекристаллизации при повышенных температурах. Модифицирование волокнистой морфологии при ионном облучении зависит от температуры мишени. При повышенной температуре (200-400°C) наблюдается гофрирование волокон: ребра гофров перпендикулярны оси волокна, грани имеют правильную призматическую форму и наноразмерную шероховатость. Более подробно, см. «8-4-WEB».

Каналирование ионов в диэлектрических капиллярах

При исследовании энергетических потерь ионов при касательном столкновении с поверхностью диэлектрика был обнаружен пик «нулевых потерь», свидетельствующий о безстолкновительном характере отклонения ионов от первоначального направления движения [13]. Последующие исследования эффекта «нулевых потерь» энергии при касательном столкновении ионов с поверхностью плоских диэлектрических капилляров привели к новому эффекту: при вращении капилляра вокруг нормальной оси на небольшой угол α , рис. 3а, пучок на выходе также отклонялся на тот же угол α , рис. 3б. Эффект может быть интерпретирован как движение пучка в периодической двумерной структуре зарядов, наведенных на стенках диэлектрика, т.е. в двумерном кулоновском кристалле [14-15]. Эффект может быть использован для управления ионным пучком из ускорителя [15-16], а также для лечения опухолевых заболеваний на клеточном уровне локальности [16]

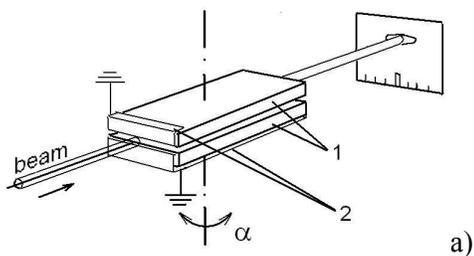
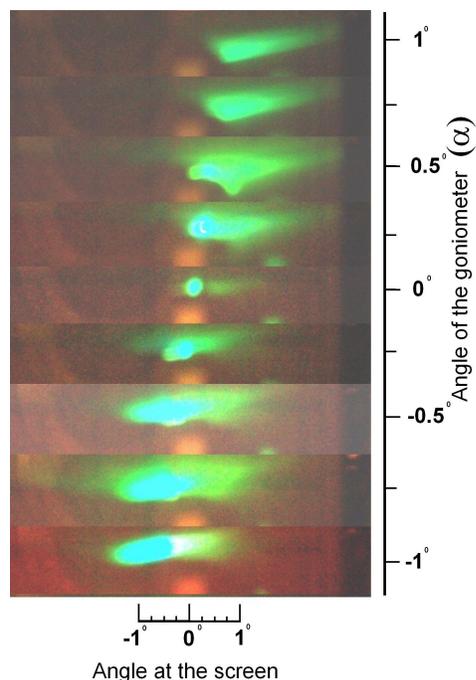


Рис.3. Схема эксперимента (а) по касательному столкновению ионов с поверхностью плоских диэлектрических капилляров и демонстрация отклонения пучка (б) при небольшом вращении α капилляра вокруг нормальной оси (а).



б)

Определение местоположения примесных атомов водорода в кристаллической решетке кремния

В 1970-1980-х годах в ОФАЯ НИИЯФ были выполнены пионерские работы по разработке ионно-пучковых методик и определению местоположения примесных атомов и дефектов в решетке кристаллов [18-20]. Развитием этих работ является новый метод, предложенный в работах группы Г.П. Похила [21-22]. С помощью разработанного этой группой метода ERD/C, было определено местоположение водорода в решетке кремния, рис. 4. Проведено моделирование структуры водородного дефекта и показана возможность существования двух устойчивых зарядовых состояния этого дефекта, что может быть причиной нестабильности времени удержания информации ячейками динамической памяти произвольной адресации (DRAM) [22].

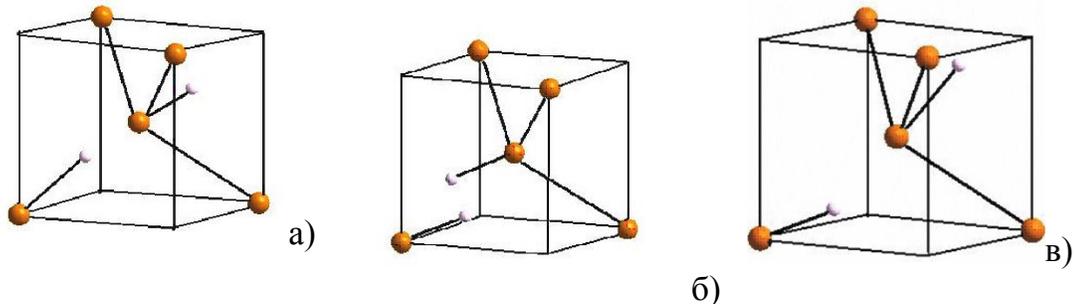


Рис. 2. Возможные конфигурации дефекта, создаваемого примесными атомами водорода в кремнии. Светлые шары – H, темные шары – Si. Установленные координаты водорода таковы: а-($0.17a, 0.079a, 0.17a$) и ($0.329a, 0.42a, 0.329a$), б- ($0.17a, 0.079a, 0.079a$) и ($0.079a, 0.17a, 0.17a$), в- ($0.17a, 0.079a, 0.079a$) и ($0.329a, 0.42a, 0.42a$), где $a=5.4 \text{ \AA}$.

Развитие методов прогнозирования радиационно-индуцированных сбоев бортовой электроники космических аппаратов.

В ОФАЯ НИИЯФ МГУ развиваются компьютерные методы прогнозирования сбоев бортовой электроники космических аппаратов, вызванных высокоэнергетичной протонной и более тяжелой компонентами космических лучей. Такие сбои с определенной вероятностью могут происходить в том случае, если ионизационные потери пролетающей частицы через чувствительный участок компонентов электроники достаточно велики, чтобы концентрация образовавшихся электрон-дырочных пар превышала критическую концентрацию для данного элемента. Протоны с энергиями в несколько десятков до сотен МэВ доминируют в космических лучах солнечного происхождения, но сами по себе имеют пренебрежимо малый ионизационный эффект. Однако продуктами ядерных реакций являются массивные фрагменты, имеющие кинетические энергии в диапазоне больших удельных ионизационных потерь.

Поэтому важной задачей данного направления является выработка методик предсказания выходов фрагментов с различным зарядом, массой и энергией. Результаты проводимых работ опубликованы в статьях [23-25]

6. Основные публикации

1. Машкова Е.С., Теплова Я.А., Тулинов А.Ф., Чеченин Н.Г. Взаимодействие ионов с веществом. В сб. Энциклопедия Московского Университета. Научно-Исследовательский институт ядерной физики, -М: Из-во «Библион-Русская книга», 2005 г., с 101-120.
2. Белкова Ю.А., Теплова Я.А. Эффекты перезарядки при торможении легких ионов в твердом веществе // Изв.РАН, сер.физ. 2006. Т.70. №6 С.856-858
3. И.С. Дмитриев, Я.А. Теплова, Ю.А. Файнберг. Образование литиеподобных ионов бора и азота с состоянии 4P3/2 газовых средах // Оптика и Спектроскопия, 2008, т.105, №2, с.210-214.
4. Н.В. Новиков. // Поверхность, 2008, №4, с.47- 50.
5. И.С. Дмитриев, Я.А. Теплова, Ю.А. Белкова, Н.В. Новиков // Поверхность, 2008, №4, с.11-14.
6. Н.В. Новиков, Я.А. Теплова // Поверхность, 2008, №5 с.34-37.
7. Ю.А. Белкова, Я.А. Теплова. // Известия РАН. Сер. Физ., 2008, т.72, №5, с.658-680.
8. Chernysh V.S., Patrakeev A.S., Shulga V.I. Angular distribution of atoms sputtered from germanium by 1-20 keV Ar ions // Rad. Effects and Defects in Solids. 2006. V.161. P.701-707.
9. В.С. Черныш, А.С. Патракеев, С.С. Еловигов, В.И. Шульга // Поверхность, 2008 №2, с.9–14.
10. V.S. Chernysh, A.S. Patrakeev, V.I. Shulga // Rad. Eff. and Defects in Solids, 2008, v.163, p.597–603.
11. V.I. Shulga // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., 2008, v.B266, p.949–954.
12. Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Немов А.С., Питиримова Е.А. Угловые и температурные зависимости ионно-электронной эмиссии высокоориентированного пирографита // Поверхность, 2006, №1, с. 7-13.
13. Вохмянина К.А., Жилияков Л.А., Костановский А.В., Куликаускас В.С., Похил Г.П., Петухов В.П., Тулинов А.Ф. Транспортировка пучка протонов через кварцевую трубку// Поверхность №3, с. 55-58 (2005).
14. К.А.Вохмянина, Л.А.Жилияков, Г.П.Похил, В.Б.Фридман, А.Ф.Тулинов Модель транспортировки пучков заряженных частиц в диэлектрических каналах // Поверхность №4, с.94-100 (2006)
15. K A Vokhmyanina, L A Zhilyakov, A V Kostanovsky, V S Kulikauskas, V P Petukhov and G P Pokhil Transportation and focusing of accelerated proton beams by means of dielectric channels // Phys. A: Math. Gen. **39** (2006) 4775–4779
16. Похил Г.П., Вохмянина К.А., Жилияков Л.А., Т. Ikeda, Y. Kanai, Y. Iwai, Т.М. Kojima, Y. Yamazaki Ion Guiding through a Flat Insulating Channel // Известия РАН, серия физическая, 2008, т.72, №5, стр. 674-679,
17. Y. Iwai, Т. Ikeda, Т.М. Kojima, Y. Yamazaki, K. Maeshima, N. Imamoto, Т. Kobayashi, Т. Nebiki, Т. Narusawa, and Pokhil G.P., Ion irradiation in liquid of μm^3 region for cell surgery // Appl. Phys. Lett. **92**, 023509 (2008).
18. Чеченин Н.Г. Структурные эффекты при ионном и лазерном воздействии на полупроводниковые соединения. Исследование методом каналирования ионов в кристаллах. // -Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. НИИЯФ МГУ, 1990, 303с.

19. Chumanov V. Ya., Pokhil G.P., Tulinov A.F. Localization of the impurity atoms in single crystals using the oscillation of the Rutherford backscattering yield in planar channeling. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B, 1984, B2, , pp. 744-746
20. Pokhil G.P., Tulinov A.F., Turinge A.A. Dvurechenskii A.V., Popov V.P. A planar channeling technique to study the structure of the complexes, formed by arsenic in silicon at high concentration. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B, 1986, v.15, no. 1, pp. 84-86.
21. Похил Г.П., Тулинов А.Ф., Попов В.П., Фридман В.Б. Исследование плоских водородных дефектов в кремнии методом каналирования. Поверхность №3, с.59-63 (2005)
22. Г.П. Похил, В.П. Попов, М.А. Ильницкий, В.Б. Фридман Исследование возможной зарядовой бистабильности водородного дефекта H_2^* // Поверхность №4, с.11-15 (2007)
23. Чувильская Т.В., Широкова А.А., Кадменский А.Г., Чеченин Н.Г., «Спектры ядер отдачи при взаимодействии протонов космических лучей с элементами электроники космических аппаратов» *Ядерная Физика*, том 71, вып. 7, 2008, с. 1319-1323
24. Н.Г. Чеченин, А.Г. Кадменский, Т.В. Чувильская, А.А. Широкова. Энергетические, массовые и зарядовые спектры ядерных фрагментов при взаимодействии протонов космических лучей с бортовой электроникой космических аппаратов. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. Научно-технический сборник. Выпуск 1. Москва. 2008 г., с.28-31
25. Н.Г. Чеченин, Т.В. Чувильская, А.А. Широкова, А.Г. Кадменский. «Фрагментация кремния под действием космических протонов высокой энергии». *Ядерная Физика*, том 72, вып. 10, 2008, с. 1825-1830

7. Отчеты

2009

2008

2007