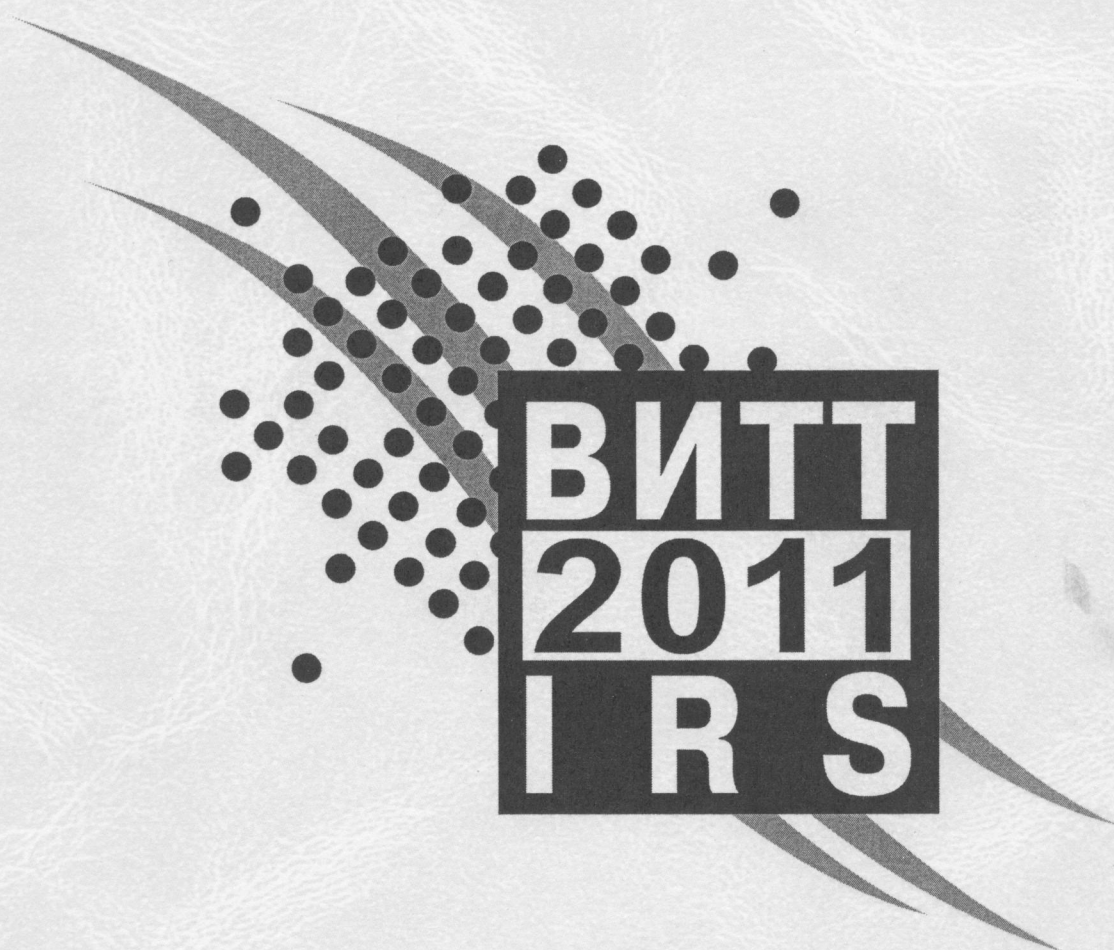


**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
ИЗЛУЧЕНИЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ**

**INTERACTION OF RADIATION  
WITH SOLIDS**



***БИТТ-2011***

Материалы  
9-й Международной  
конференции  
Минск, Беларусь  
20–22 сентября 2011

***IRS-2011***

Proceedings  
of the 9th International  
Conference  
Minsk, Belarus  
September 20–22, 2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ  
БЕЛОРУССКИЙ РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ФОНД  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

## INTERACTION OF RADIATION WITH SOLIDS

Материалы 9-й Международной конференции  
Минск, 20–22 сентября 2011 г.

Минск  
«Издательский центр БГУ»  
2011

УДК 537.5 (043.2)  
ББК 22.333  
В40

Редакционная коллегия:  
профессор, доктор физико-математических наук *В. М. Анищик*  
(ответственный редактор);  
профессор, доктор физико-математических наук *В. В. Углов*;  
кандидат физико-математических наук *Л. В. Баран*;  
кандидат физико-математических наук *И. И. Азарко*

**Взаимодействие** излучений с твердым телом = Interaction of Radiation with Solids : материалы 9-й Междунар. конф., Минск, 20–22 сент. 2011 г. / редкол. : В. М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. — Минск : Изд. центр БГУ, 2011. — 469 с.  
ISBN 978-985-476-939-4.

В сборнике приведены доклады, представленные на 9-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (20–22 сентября 2011 г., Минск) и охватывающие следующие тематики: процессы взаимодействия излучений с твердым телом, радиационные эффекты в твердом теле, взаимодействие плазмы с поверхностью, модификация свойств материалов, формирование, структура и свойства покрытий, оборудование для радиационных технологий.

Адресуется научным сотрудникам и студентам естественнонаучных факультетов вузов.

УДК 537.5 (043.2)  
ББК 22.333

ISBN 978-985-476-939-4

© БГУ, 2011

### **Программный комитет**

Абламейко С.В. - председатель (Беларусь)  
Анищик В.М. - зам. пред. (Беларусь)  
Комаров Ф.Ф. - зам. пред. (Беларусь)  
Баран Л.В. - ученый секретарь (Беларусь)

Асташинский В.М. (Беларусь)  
Белый А.В. (Беларусь)  
Бондаренко Г.Г. (Россия)  
Веш В. (Германия)  
Григонис А. (Литва)  
Жук Е. (Польша)  
Жуковский П. (Польша)  
Кадыржанов К.К. (Казахстан)  
Коваль Н.Н. (Россия)  
Коршунов Ф.П. (Беларусь)  
Лигачев А.Е. (Россия)  
Неклюдов И.М. (Украина)  
Овчинников В.В. (Россия)  
Орлович В.А. (Беларусь)  
Пилипенко В.А. (Беларусь)  
Погребняк А.Д. (Украина)  
Похил Г.П. (Россия)  
Ремнев Г.Е. (Россия)  
Скуратов В.А. (Россия)  
Углов В.В. (Беларусь)  
Федосюк В.М. (Беларусь)  
Шулов В.А. (Россия)

### **Оргкомитет конференции**

Азарко И.И.  
Гусакова С.В.  
Казючиц В.Н.  
Поляк Н.И.  
Русальский Д.П.  
Ходасевич В.В.  
Черенда Н.Н.

### **Program Committee**

Ablameiko S.V. - Chairman (Belarus)  
Anishchik V.M. - Deputy Chairman (Belarus)  
Komarov F.F. - Deputy Chairman (Belarus)  
Baran L.V. - Scientific Secretary (Belarus)

Astashinskij V.M. (Belarus)  
Bondarenko G.G. (Russia)  
Byeli A.V. (Belarus)  
Fedosyuk V.M. (Belarus)  
Grigonis A. (Lithuania)  
Kadyrzhhanov K.K. (Kazakhstan)  
Korshunov F.P. (Belarus)  
Koval N.N. (Russia)  
Ligachev A.E. (Russia)  
Neklyudov I.M. (Ukraine)  
Orlovich V.A. (Belarus)  
Ovchinnikov V.V. (Russia)  
Pilipenko V.A. (Belarus)  
Pogrebnyak A.D. (Ukraine)  
Pokhil G.P. (Russia)  
Remnev G.E. (Russia)  
Skuratov V.A. (Russia)  
Shulov V.A. (Russia)  
Uglov V.V. (Belarus)  
Wesch W. (Germany)  
Zuk J. (Poland)  
Zhukovski P. (Poland)

### **Organizing Committee**

Azarko I.I.  
Gusakova S.V.  
Kazuchits V.N.  
Poliak N.I.  
Rusalsky D.P.  
Hodasevich V.V.  
Cherenda N.N.



## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
<b><u>Секция 1</u></b>	
<b><u>Процессы взаимодействия излучений и плазмы с твердым телом</u></b>	
<b>A.M. Chaplanov, C. Karwat, V.V. Kolos, M.I. Markevich, P. Zukowski, V.F. Stelmakh</b> Pulse photon treatment of TiN/Ti/Si system.....	13
<b>A.A. Deshkovskaya, L.D. Bogomolova</b> The states of erbium in silica glasses implanted with Er <sup>+</sup> ions.....	15
<b>M. Dmitruk, V. Khivrych, O. Kondratenko, P. Kuchynsky, M. Pinkovska, L. Vlasukova</b> Study of Si surface modification with irradiation, plasma and ultrasound for gas sensing application.....	17
<b>V. Kuzmin</b> Recent progress in evaluation of low-energy electronic stopping: What we can expect from use of reciprocity?.....	20
<b>D. Sokaras, A. G. Kochur, M. Müller, M. Kolbe, B. Beckhoff, M. Mantler, Ch. Zarkadas, M. Andrianis, A. Lagoyannis, and A. G. Karydas</b> Cascade L emission from solid iron samples upon photon excitation across the K-threshold.....	23
<b>P.P. Trokhimchuck</b> Modeling of Relaxed Optical phenomena in silicon, germanium, diamond and graphite.....	26
<b>Р.М. Баязитов</b> Импульсно-пучковые обработки в кремниевой электронике – возможности и перспективы..	29
<b>Д.С. Вершинин, М.Ю. Смолякова</b> Влияние структурно-фазового состава на свойства титановых сплавов при низкотемпературном азотировании в смеси газов.....	32
<b>Е.И. Гацкевич, Г.Д. Ивлев, А.В. Двуреченский, Ж.В. Смагина</b> Лазерно-индуцированные фотолюминесценция и инфракрасное излучение Ge/Si гетероструктур.....	35
<b>О.И. Гетьман, В.В. Паничкина, П.Я. Радченко, А.В. Самелюк, В.В. Скороход, А.Г. Еремеев, И.В. Плотников, Л.Н. Парицкая</b> Влияние СВЧ поля на массоперенос и изменение микроструктуры в оксидной керамике Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ZrO <sub>2</sub> )-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	37
<b>О.А. Голосова, Г.Е. Ремнев, Г.В. Потемкин, Е.А. Лигачева, А.Е. Лигачев</b> Взаимодействие импульсных ионных пучков с поверхностью графита.....	40
<b>В.К. Гончаров, К.В. Козадаев, Д.В. Щегрикович</b> Начало процесса конденсации в лазерных эрозионных факелах металлов.....	42
<b>К.Ф. Ермалицкая</b> Эрозия поверхности металлов под воздействием сдвоенных лазерных импульсов.....	44
<b>Ю.Ф. Иванов, Н.Н. Коваль</b> Высокоинтенсивные электронные пучки: получение и применение в области материаловедения.....	47
<b>Д.А. Котов, А.А. Ясюнас</b> Процесс плазменного травления при создании структуры МЭМС-переключателя.....	49
<b>А.В. Леонов, И.Д. Феранчук</b> Нелинейные эффекты во взаимодействии резонансного поля с полупроводниковыми структурами.....	51
<b>В.А. Лиопо, А.Ю. Иванов, С.Л. Гей</b> Рентгендифрактометрические исследования изменений структуры металлов после их лазерной обработки.....	54
<b>Л.С. Лысюк, А.А. Чеховский, А.В. Рагуля, В.М. Огенько, С.В. Волков</b> Некоторые особенности взаимодействия графита с низкотемпературной плазмой водорода.....	57
<b>О.И. Марков, Ю.В. Хрипунов</b> Явление самоорганизации структуры поверхности монокристалла висмута под действием атомарного водорода.....	59

<b>А.Г. Масловская</b> Динамическая модель процесса зарядки полярных диэлектриков электронными пучками средних энергий.....	62
<b>А.А. Минько, П.Н. Белый, М.П. Патапович, М.В. Кудин</b> Изучение влияния сезонности на экологию окружающей среды на примере послойного анализа химического состава коры ели методом лазерной искровой спектрометрии.....	65
<b>В.В. Могильный, А.И. Станкевич, А.В. Трофимова</b> Фотопревращение бензальдегидсодержащих полимеров под действием УФ излучения.....	68
<b>Ю.А. Петухов, А.В. Пунько</b> Фазообразование в системах металл-кремний при воздействии компрессионных плазменных потоков.....	71
<b>Г.П. Похил, В.В. Чердынцев</b> Модель динамики прохождения ионов через диэлектрические капилляры.....	74
<b>В.Д. Сарычев</b> Математические модели формирования плазменных потоков при электрическом взрыве проводников.....	76
<b>М.Ю. Смолякова, Д.С. Вершинин, И.М. Трегубов</b> Исследование влияния низкотемпературного азотирования на структурно-фазовый состав и свойства аустенитной стали.....	80
<b>Е.А. Солдатенко, Ю.А. Колубаева</b> Влияние плотности энергии и длительности импульса сильноточного электронного пучка на внутреннюю структуру твердого сплава Т15К6.....	83
<b>А.Р. Фадаиян, Лэ Тхи Ким Ань, А.П. Забогин</b> Исследование влияния междуимпульсного интервала на эффективность процессов пробивки металлов сдвоенными лазерными импульсами.....	86
<b>Н.Х. Чинь, А.Р. Фадаиян, Е.С. Воропай</b> Спектральный контроль и управление процессами образования оксидов алюминия в плазме при воздействии на алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов.....	88

## **Секция 2**

### **Радиационные эффекты в твердом теле**

<b>V.A. Skuratov, V.V. Uglov, A.S. Sokhatsky, S.V. Zlotski, A.J. van Vuuren, Jan Neethling, J. O'Connell</b> Radiation stability of nanocrystalline ZrN coatings irradiated with high energy Xe and Bi ions.....	91
<b>И.И. Азарко, О.В. Игнатенко, И.А. Карпович, В.А. Комар, В.Б. Оджаяев, Н.А. Шемпель</b> ЭПР исследование облученных электронами микропорошков кубического нитрида бора...	94
<b>А.Е. Беляев, А.В. Саченко, Н.С. Болтовец, В.Н. Иванов, Р.В. Конакова, Я.Я. Кудрик, В.В. Миленин, С.В. Новицкий, В.Н. Шеремет</b> Влияние микроволнового излучения на механизм протекания тока в омических контактах Au-TiB <sub>x</sub> -AuGe-n-p <sup>+</sup> -n <sup>++</sup> -InP (GaAs).....	96
<b>Д.И. Бринкевич, В.С. Просолович, Ю.Н. Янковский</b> Особенности диффузии редкоземельных элементов при отжиге ионно-имплантированных слоев кремния.....	99
<b>В.А. Буренков, А.Р. Челябинский</b> Моделирование диффузии имплантированного фосфора в кремнии.....	102
<b>С.А. Вабищевич, Н.В. Вабищевич, Д.И. Бринкевич, В.С. Просолович, Ю.Н. Янковский</b> Микромеханические свойства слоев кремния, имплантированных ионами бора и фосфора	104
<b>В.А. Варлачев, Е.Г. Емец, Е.С. Солодовников</b> Влияние быстрых нейтронов на проводимость простых полупроводников.....	107
<b>В.И. Варнина, А.А. Гроза, П.Г. Литовченко, Л.С. Марченко, М.И. Старчик, Г.Г. Шматко</b> Эффекты самоорганизации радиационных дефектов в кремнии, облученном высокоэнергетическими легкими ионами.....	110
<b>О.И. Величко, Е.А. Гундорина, В.В. Аксенов</b> Некоторые особенности переноса ионно-имплантированного бора в условиях подавления скоротечной диффузии.....	113

<b>О.И. Величко, А.П. Ковалева</b> Моделирование перераспределения ионно-имплантированного бора в различных условиях подавления скоротечной диффузии.....	115
<b>А.А. Гаралацкий, П.Е. Троян</b> Исследование адгезионного слоя пленки $\text{TeO}_2$ с индентированной платиновой подложкой после радиационной нагрузки дейтронами 13 МэВ.....	118
<b>М.В. Гольцев, В.П. Гольцев, А. Хофман</b> Радиационные эффекты изменения свойств сплавов на основе ванадия, имплантированных высокоэнергетическими ионами ксенона.....	121
<b>А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Ефремова, А.В. Шуклинов, В.В. Родаев, В.В. Коренков, А.Р. Ловцов</b> Влияние низкоинтенсивного бета-облучения на свойства приповерхностных слоев кремния.....	123
<b>Д.В. Корбутяк, А.П. Лоцько, М.Д. Вахняк, Л.А. Демчина, Р.В. Конакова, В.В. Миленин, Р.А. Редько, Ю.В. Быков, С.В. Егоров, А.Г. Еремеев</b> Влияние микроволнового излучения на низкотемпературную фотолюминисценцию монокристаллов $\text{CdTe:Cl}$ .....	125
<b>А.П. Долголенко</b> Дрейфовые барьеры в n-Si, облученном быстрыми нейтронами реактора, в зависимости от флюенса, температуры измерения и отжига.....	128
<b>С.С. Зырянов, А.В. Кружалов, Ф.Г. Нешов, О.В. Рябухин</b> Моделирование радиационно-стимулированной йодной коррозии в металлах, облученных протонами.....	131
<b>Ф.П. Коршунов, И.Г. Марченко, Н.Е. Жданович</b> Отжиг радиационных дефектов в электронно-облученных Mo/n-Si-структурах Шоттки.....	133
<b>В.В. Литвинов, А.Н. Петух, Ю.М. Покотило, В.П. Маркевич, С.Б. Ластовский</b> Формирование и отжиг радиационных дефектов в легированных оловом кристаллах германия p-типа.....	136
<b>С.В. Лунёв, П.П. Шигорин</b> Влияние $\gamma$ -облучения на параметр анизотропии подвижности носителей заряда в одноосно деформированных кристаллах n-Si.....	138
<b>Л.Ф. Макаренко, С.Б. Ластовский, Л.И. Мурин, Ф.П. Коршунов, Н.М. Казючиц, Я.И. Латушко</b> Характеристики междоузельных реакций в кремнии и кремний-германиевых сплавах, облученных альфа-частицами.....	141
<b>В.В. Малашенко, Т.И. Малашенко, В.В. Моисеенко</b> Специфика дислокационного скольжения в металлах и сплавах с высокой концентрацией радиационных дефектов.....	144
<b>О.М. Михалкович, В.Е. Гусаков, И.С. Ташлыков</b> Массоперенос в Si при нанесении Ti тонких пленок, ассистированном собственными ионами.....	147
<b>А.Д. Мурадов, М.И. Ким, А.И. Купчишин</b> Влияние ВТСП наполнителя и гамма-облучения на систему «полиимид – $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,7}$ ».....	150
<b>И.М. Неклюдов, В.Н. Воеводин, Г.Д. Толстолицкая</b> Эффекты взаимодействия потоков заряженных частиц с твердыми телами. Современный статус имитационных исследований.....	154
<b>Г.Д. Толстолицкая, И.Е. Копанец, И.М. Неклюдов, В.Н. Воеводин</b> Пространственное распределение и местоположение в решетке радиационных дефектов и примесей инертных газов.....	157
<b>Л.С. Новиков, Е.Н. Воронина, В.А. Демидов, М.С. Самохина, В.Н. Черник, Н.П. Чирская, А.Ю. Алентьев, К.Б. Вернигоров, Г.Г. Бондаренко, А.И. Гайдар, А.А. Ерискин</b> Стойкость полимерных нанокомпозитов к воздействию космических излучений.....	161
<b>А.Н. Озерной, М.Ф. Верещак, И.А. Манакова, В.С. Русаков, К.К. Кадыржанов</b> Мессбауэровские исследования слоистой системы Fe-Be после облучения ионами гелия..	165

## СТОЙКОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ КОСМИЧЕСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Л.С. Новиков<sup>1)</sup>, Е.Н. Воронина<sup>1)</sup>, В.А. Демидов<sup>1)</sup>, М.С. Самохина<sup>1)</sup>, В.Н. Черник<sup>1)</sup>, Н.П. Чирская<sup>1)</sup>, А.Ю. Алентьев<sup>2)</sup>, К.Б. Вернигоров<sup>2)</sup>, Г.Г. Бондаренко<sup>3)</sup>, А.И. Гайдар<sup>3)</sup>, А.А. Ерискин<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ

Ленинские Горы, д.1, стр. 2, 119991, Москва, e-mail: [novikov@sinp.msu.ru](mailto:novikov@sinp.msu.ru)

<sup>2)</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, химический факультет

Ленинские Горы, д.1, стр. 1, 119991, Москва, e-mail: [konstantin\\_verni@mail.ru](mailto:konstantin_verni@mail.ru)

<sup>3)</sup>Московский государственный институт электроники и математики (Технический университет), Б. Трехсвятительский пер., д. 3/12, 109028, Москва, e-mail: [bonдарenko\\_qg@rambler.ru](mailto:bonдарenko_qg@rambler.ru)

В работе экспериментальными и расчетно-теоретическими методами исследована стойкость полимерных нанокм-позитов, рассматриваемых в настоящее время в качестве перспективных материалов космической техники, к воздействию потока атомарного кислорода и частиц космической радиации. Показано, что уровень стойкости нанокм-позитов достаточен для применения их в составе конструкции космических аппаратов и систем радиационной защиты.

### Введение

Полимерные нанокм-позиты относят к числу перспективных материалов для применения в космической технике. Возможность создания легких полимерных нанокм-позитов, обладающих высокой прочностью и термостойкостью, а также необходимыми электрическими, оптическими и другими характеристиками, делает их пригодными для применения в качестве как конструкционных, так и функциональных материалов космических аппаратов (КА) [1]. Одним из главных требований, предъявляемых к материалам КА, является сохранение ими исходных параметров при длительной эксплуатации в условиях космического пространства.

В полете КА подвергается воздействию обширного комплекса факторов космического пространства: потоков электронов и ионов высокой энергии, плазмы, солнечного электромагнитного излучения, метеорных частиц и т. д. В результате такого воздействия в материалах и элементах оборудования КА протекают разнообразные физико-химические процессы, приводящие к ухудшению их эксплуатационных параметров [2].

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований воздействия на полимерные нанокм-позиты потока атомарного кислорода (АК), являющегося основным повреждающим фактором для материалов поверхности низкоорбитальных КА, и заряженных частиц высокой энергии, входящих в состав космического излучения.

### Воздействие атомарного кислорода на полимерные нанокм-позиты

Атомарный кислород является основным компонентом верхней атмосферы Земли в интервале высот ~ 200–800 км, где осуществляются, в частности, пилотируемые полеты на орбитальных станциях (350–400 км) и космических кораблях, а также функционируют многие КА прикладного назначения. Температура верхней атмосферы на указанных высотах близка к  $10^3$  К, ей соответствует средняя энергия теплового движения частиц ~ 0,1 эВ. Однако по отношению к КА, движущемуся со скоростью около 8 км·с<sup>-1</sup>, кинетическая

энергия атомов набегающего потока кислорода составляет около 5 эВ. Высокая окислительная способность АК, усиленная указанной дополнительной энергией, является причиной его интенсивного разрушающего воздействия на полимерные материалы, находящиеся на внешней поверхности КА. Для них уменьшение толщины слоя после года эксплуатации в указанных условиях может достигать нескольких десятков и даже сотен микрометров [3]. В этой связи уделяется большое внимание повышению стойкости полимеров, что может достигаться путем введения в приповерхностные слои наноразмерных частиц, и созданию специальных полимерных нанокм-позитов, устойчивых к воздействию АК и других факторов космического пространства.

В настоящей работе проводилось экспериментальное исследование стойкости некоторых полимерных нанокм-позитов к воздействию потока АК, который создавался магнитоплазмодинамическим ускорителем, разработанным в НИИЯФ МГУ [3]. Схема ускорителя показана на рис. 1.

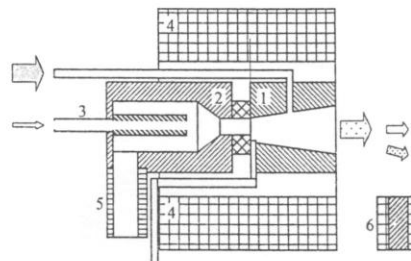


Рис. 1. Схема ускорителя кислородной плазмы НИИЯФ МГУ: 1 – анод; 2 – ферромагнитный промежуточный электрод; 3 – полевой термокатод; 4 – соленоид; 5 – патрубок дополнительной вакуумной откачки; 6 – отклоняющий электромагнит

Кислородная плазма, образующаяся в разрядном промежутке, ускоряется при истечении в вакуум электрическим полем, возникающим в расходящемся магнитном поле соленоида. Средняя энергия ионов в потоке регулируется в диапазоне 20–80 эВ путем изменения режимов



электрического и газового питания. При этом плотность потока ионов и нейтральных частиц кислорода на поверхности образца площадью  $10 \text{ см}^2$  составляет  $(1-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Для формирования нейтрального пучка атомов и молекул кислорода ионы выводятся из потока плазмы вдоль силовых линий магнитного поля соленоида, искривленных отклоняющим электромагнитом 6. Энергия нейтральных частиц уменьшается до  $5-10 \text{ эВ}$  при плотности потока  $10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

В настоящей работе было выполнено исследование возможностей повышения таким методом стойкости полиимидных пленок к воздействию АК. Для модификации полимеров использовались частицы сверхразветвленного полизотоксисилоксана, представляющих собой ядро из частиц  $\text{SiO}_2$  с присоединенными к нему группами  $(-\text{OC}_2\text{H}_5)$ , а также наночастицы некоторых оксидов и карбидов [4].

Результаты выполненных исследований показали, что при изготовлении модифицированных образцов полимерной пленки во многих случаях наблюдается эффект объединения наночастиц в округлые конгломераты диаметром  $\sim 0,1-5 \text{ мкм}$ , которые отчетливо видны после травления пленки потоком АК, что наглядно демонстрируется рис. 2 и рис. 3.

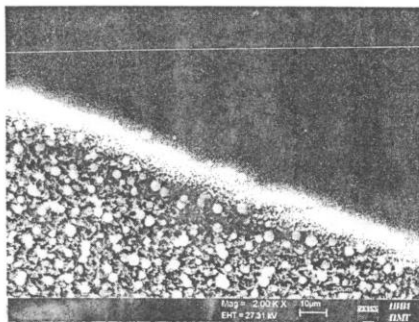


Рис. 2. Образец полиимидной пленки: слева внизу – после воздействия потока АК; справа вверху – поверхность, закрытая от воздействия АК

На рис. 3 хорошо видно, что образующиеся округлые микрочастицы защищают области полимера, находящиеся под ними, от растравливания АК. На основании полученных экспериментальных данных было найдено, что в результате такой модификации потери массы полимеров при воздействии АК снижаются в 3–4 раза при содержании частиц модификатора в образце около 5–6 вес. %.

Для обеспечения более высоких уровней защиты полимеров необходимо стремиться к равномерному распределению вводимых частиц наполнителя в полимерной матрице. Процесс диспергирования («растворимости») наночастиц в полимере определяется соотношением интенсивностей взаимодействия наночастицами между собой и наночастиц с полимерной матрицей. Например, если взаимодействие между наночасти-

цами доминирует, они стремятся объединяться в конгломераты и равномерного распределения их по объему полимера достигнуть не удастся.

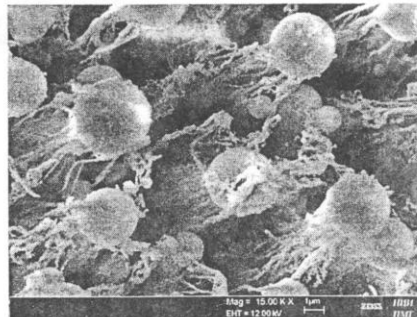


Рис. 3. Структура модифицированного полиимида после воздействия потока АК

Методом диссипативной динамики частиц (dissipative particle dynamics, DPD), в рамках которого фрагменты молекул, сами молекулы или группы молекул объединяются в так называемые «бусинки» (beads), взаимодействующие друг с другом [5], в настоящей работе было выполнено математическое моделирование распределения наночастиц наполнителя в полимерной матрице. Результаты моделирования показывают, что при определенных параметрах взаимодействия наночастицы объединяются в сферические конгломераты (рис. 4), подобные показанным на рис. 3.

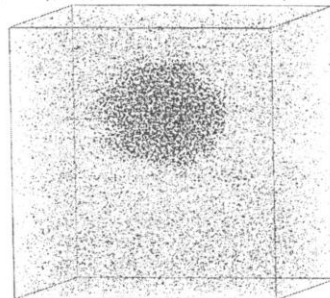


Рис. 4. Формирование в полимерной матрице сферического образования из наночастиц

### Радиационные эффекты в наноструктурах

К важнейшим факторам, вызывающим ухудшение эксплуатационных характеристик материалов и элементов оборудования КА, относятся также воздействие на них потоков электронов и ионов с энергиями  $\sim 10^6-10^{20} \text{ эВ}$ , которые принято называть космическим ионизирующим излучением, или космической радиацией.

Радиационные эффекты, возникающие под действием ионизирующего излучения в наноструктурах и созданных на их основе материалах, имеют ряд особенностей по сравнению с анало-

гичными эффектами в объектах, размеры которых лежат в микро- и макродиапазонах.

Очевидно, что при взаимодействии электрона или иона высокой энергии, характерной для космического излучения, с наноструктурой ей передается лишь очень незначительная энергия налетающей частицы. Следовательно, в наноразмерном объекте возникает малое количество дополнительных носителей заряда или структурных дефектов.

В наноматериалах, для которых характерно наличие большего количества поверхностей раздела, действует эффективный механизм стока смещенных атомов на эти поверхности, препятствующий накоплению радиационных дефектов в объеме зерен. Вместе с тем сохраняется возможность выхода смещенных атомов на поверхность образца по границам зерен.

В настоящее время при создании нанокомпозитов в качестве наполнителей широко применяются углеродные нанотрубки (УНТ) и нанотрубки из нитрида бора BN (BN-НТ). Характерные радиационные эффекты, протекающие в стенках УНТ при облучении ее пучком электронов показаны на рис. 5 [6].

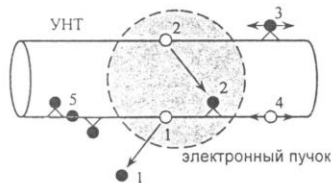


Рис. 5. Схема процессов, инициируемых воздействием электронного пучка на УНТ: 1 – образование вакансии в стенке УНТ в результате удаления атома углерода; 2 – образование вакансии с адсорбцией выбитого атома на внутренней поверхности УНТ; 3 – миграция адсорбированного атома; 4 – миграция вакансий; 5 – перемещение адсорбированных атомов между поверхностями УНТ через обменный процесс

В данной работе было выполнено математическое моделирование процессов взаимодействия протонов, характерных для космического излучения, с УНТ. Использовался метод DFTB (density functional tight-binding), представляющий собой расширение метода теории функционала плотности (density functional theory, DFT) для возбужденных состояний, называемый также методом DFT в схеме сильной связи [7]. На рис. 6 приведен пример результатов моделирования: образование вакансий и адсорбированных атомов.

Предполагается, что на основе нанокомпозитов удастся создать высокоэффективные системы радиационной защиты КА. В этой связи большой интерес представляют полимерные нанокомпозиты с наполнителями в виде BN-НТ и частиц  $V_4C_3$ , поскольку они содержат элементы с малыми значениями заряда ядра  $Z$ .

На рис. 7 приведены результаты расчета с помощью программного комплекса GEANT3 [8] ослабления различными материалами потока энергии  $P$ , переносимого падающими на исследуемый образец материала протонами с энергией

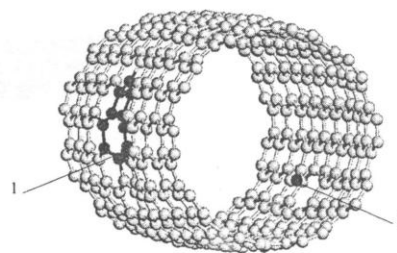


Рис. 6. Вакансия (1) и адсорбированный атом (2), образовавшиеся в результате воздействия протона

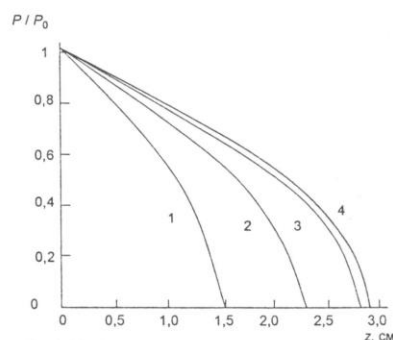


Рис. 7. Эффективность радиационной защиты в зависимости от толщины экрана: 1 – алюминий; 2 – полиэтилен с добавлением 10% объемн.  $V_4C_3$ ; 3 – полиэтилен с добавлением 10% объемн. BN; 4 – полиэтилен

60 МэВ. Нанокомпозиты с наполнителями  $V_4C_3$  и BN позволяют создать защитные экраны, дающие выигрыш по весовым характеристикам.

### Заключение

Результаты выполненной работы показывают, что полимерные нанокомпозиты по своим свойствам превосходят многие традиционные материалы космической техники. Их стойкость к воздействию атомарного кислорода в несколько раз выше по сравнению с полимерами. Равномерность распределения частиц наполнителя в матрице может нарушаться за счет обнаруженных экспериментально и исследованных расчетно-теоретическими методами процессов образования конгломератов из наноразмерных частиц. Полимерные нанокомпозиты могут обладать высокой радиационной стойкостью и использоваться в системах радиационной защиты космических аппаратов.

### Список литературы

1. Новиков Л.С., Воронина Е.Н. Перспективы применения наноматериалов в космической технике. – М.: Университетская книга, 2008. – 188 с.
2. Новиков Л.С. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2010. – 4. – С. 25.

3. Новиков Л.С., Черник В.Н. Применение плазменных ускорителей в космическом материаловедении. – М.: Университетская книга, 2008. – 90 с.
4. Вернигоров К.Б., Алентьев А.Ю., Музафаров А.М., Новиков Л.С., Черник В.Н. // Функциональные наноматериалы для космической техники. Труды 1-й Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых. – М., 2010. – С.90.
5. Espanol P., et al. // Europhys. Lett. -1995. – 30. -P. 191.
6. Krashennnikov A.V., Nordlund K. // Journal of Applied Physics. -2010. - 107. 071301.
7. Frauenheim Th., et al. // Journal of Physics: Condensed Matter. -2002. - 14. - P. 3015.
8. GEANT – Detector Description and Simulation Tool. Geneva, CERN, 1993. - 465 p.

### SPACE RADIATION RESISTANCE OF POLYMERIC NANOCOMPOSITES

L.S. Novikov<sup>1</sup>), E.N. Voronina<sup>1</sup>), V.A. Demidov<sup>1</sup>), M.S. Samokhina<sup>1</sup>), V.N. Chernik<sup>1</sup>), N.P. Chirskaya<sup>1</sup>)  
 A.Yu. Alentiev<sup>2</sup>), K.B. Vernigorov<sup>2</sup>), G.G. Bondarenko<sup>3</sup>), A.I. Gaidar<sup>3</sup>), A.A. Yeriskin<sup>3</sup>)

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (MSU SINP)  
 1(2), Leninskie gory, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: [novikov@sinp.msu.ru](mailto:novikov@sinp.msu.ru)

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry 1(1), Leninskie gory, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: [konstantin\\_vern@mail.ru](mailto:konstantin_vern@mail.ru)

<sup>3</sup>Moscow Institute of Electronics and Mathematics (Technical University) 3/12, B. Trekhsviatitskii, Moscow, 109028, Russian Federation, e-mail: [bondarenko\\_gg@rambler.ru](mailto:bondarenko_gg@rambler.ru)

Polymeric nanocomposites are referred to advanced materials for applications in the space technology. Ability to create lightweight polymeric nanocomposites with high strength and thermal resistance, as well as the required electrical, optical and other characteristics, is making them suitable to be used as constructional and functional materials of the spacecraft. One of the main requirements, imposed on the spacecraft materials, is the retention of the initial parameters during the long-term operation in the space.

At the time of a space mission, the spacecraft is exposed to the space environment. As a result, various physical and chemical processes that lead to a degradation of spacecraft operating parameters occur in the materials and components of the spacecraft equipment. At the altitude ranges from 200 to 800 km, where, in particular, the manned missions on the orbital space stations (350-400 km) and space vehicles are realized, and also many application-oriented spacecraft are located, the most important damaging factor for the outer surface of the spacecraft materials is atomic oxygen, which presents in the Earth's upper atmosphere. Fluxes of electrons and ions with energies between  $10^6$  and  $10^{20}$  eV are usually called the cosmic ionizing radiation, or the space radiation. This radiation fluxes represent a significant danger to the high-altitude orbit spacecraft and interplanetary spacecraft.

This paper describes the results of experimental and theoretical studies of the effects of the mentioned factors to the polymeric nanocomposites with different fillers.

It is shown that the resistance of polymeric nanocomposites to the effects of atomic oxygen is several times higher compared to polymers. The processes of dispersion of nanoscale fillers in the matrix, which influence on the structure of the nanocomposite and its properties, are studied with experimental and theoretical methods. Based on the results of mathematical modeling of ionizing radiation flux attenuation in the polymer nanocomposites with fillers from nanotubes of boron nitride and boron carbide particles the conclusion about possibilities of application of such nanocomposites for radiation protection systems of advanced spacecraft is made.

## Авторский указатель

Chaplanov A M	13	Аминев Д.Ф.	174	Гайдар А.И.	161
A.J. van Vuuren	91	Анищик В.М.	347, 368	Гайдук П.И.	222, 275, 294
Andrianis M.	23	Апель П.Ю.	388	Галкин К.Н.	294
Barkovskaya M.M.	342	Асташинская М.В.	281	Галкин Н.Г.	294
Beckhoff B.	23	Асташинский В.М.	195, 278	Галаятдинов М.Ф.	246
Bogomolova L.D.	15	Бабенцов В.Н.	203	Гарапацкий А.А.	118
Burko V.A.	291	Бандура А.Н.	186	Гаркуша И.Е.	186
Chayeuski V.V.	342	Баран Л.В.	189, 192, 321	Гатиятова Ю.И.	339
Cherkova S.G.	286	Батаев В.А.	201	Гацкевич Е.И.	35, 203, 275
Deshkovskaya A.A.	15	Баталов Р.И.	294	Гей С.Л.	54
Dmitruk M.	17	Башко В.А.	351	Герасимов А.Б.	183
Drozdovich V.B.	342	Бащенко Л.П.	349	Герцрикен Д.С.	254, 266
Grigonis Alfonsas	284	Баязитов Р.М.	29, 294	Гетьман О.И.	37
Jan Neethling	91	Белозёрова Л.И.	415	Гиро А.В.	273
Kachurin G.A.	286	Белый П.Н.	65	Гнатюк В.А.	203
Karwat C.	13	Белько В. И.	297	Голосов Д.А.	430
Karydas A. G.	23	Беляев А.Е.	96	Голосова О.А.	40
Kazan S.	339	Бибик Н.В.	192, 195	Гольцев В.П.	121
Kesler V.G.	286	Богданов С.Е.	254	Гольцев М.В.	121
Khivrych V.	17	Болотов В.В.	312	Гончаров В.К.	42, 353, 402
Kochur A. G.	23	Болтовец Н.С.	96	Горбачук Н.И.	171, 174, 397
Kolbe M.	23	Бондаренко Г.Г.	161	Горушко В. А.	271
Kolos V.V.	13	Борисов Д.П.	399	Гребенчуков А.	231
Kondratenko O.	17	Братушко С.Н.	344	Гребень М.В.	300
Kuchynsky P.	17	Бринкевич Д.И.	99, 104	Григорьев Д.В.	206
Kukharchyk N.	289	Брюхов В.В.	243	Гроза А.А.	110
Kuzmin V.	20	Буачидзе Д.Г.	183	Громов В.Е.	201, 349
Lagoyannis A.	23	Будовских Е.А.	201, 349, 362	Гумаров Г.Г.	208
Mantler M.	23	Бузун А.А.	402	Гундорина Е.А.	113
Marin D.V.	286	Булойчик Ж.И.	333, 436, 462	Гусаков В.Е.	147, 297
Markevich M.I.	13	Бунин И.Ж.	198	Гусаков Г.А.	353, 356
Mikailzade F.A.	339	Буренков В.А.	102	Гущина Н.В.	210, 234, 261
Minialga Virgilijus	284	Бурмаков А.П.	404	Даулетмуратов Б.К.	203
Müller M.	23	Бык А.П.	402	Двуреченский А.В.	35
O'Connell J.	91	Быков Ю.В.	125	Демидов В.А.	161
Pinkovska M.	17	Бырка О.В.	186	Демчина Л.А.	125
Şale A.G.	339	Быченко О.А.	376, 391, 394	Дешковская А.	213
Skuratov V.A.	91, 286	Бычков П.В.	402	Дидковский Я.И.	168, 397
Sokaras D.	23	Вабищевич Н.В.	104	Дмитриевский А.А.	123
Sokhatsky A.S.	91	Вабищевич С.А.	104	Долгий В.К.	216
Stelmakh V.F.	13	Валеев В.Ф.	208, 339	Долголенко А.П.	128
Trokhimchuck P.P.	26	Валько Н.Г.	347, 351	Дорожкин Н.Н.	297
Uglov V.V.	91	Варлачев В.А.	107	Дорошевич И.Л.	303
Velichko O.I.	291	Варнина В.И.	110	Дудник С.А.	421
Vinciunaite Vinga	284	Вахняк М.Д.	125	Дудчик Ю.И.	402, 409
Vlasukova L.	17	Ващук Е.С.	201	Дулов Е.Н.	339
Volodin V.A.	286	Велещук В.П.	203	Егоров С.В.	125
Wieck Andreas D.	289	Величко О.И.	113, 115	Егоров Ю.П.	219
Zarkadas Ch.	23	Верещак М.Ф.	165	Емец Е.Г.	107
Zhdanok S.A.	342	Вернигоров К.Б.	161	Еремеев А.Г.	37, 125
Zlotski S.V.	91	Вершинин Д.С.	32, 80	Ерискин А.А.	161
Zukowski P.	13	Власенко А.И.	203	Ермакова А.В.	171
Аверин А.А.	180	Власов И.И.	174, 180	Ермалицкая К.Ф.	44, 407
Агеев С.П.	397	Власукова Л.А.	300, 309	Ермалицкий Ф.А.	407
Азарко И.И.	94	Воеводин В.Н.	154, 157	Ефименко И.Т.	349
Акрестина А.С.	231	Война В.В.	351	Ефремова Н.Ю.	123
Аксенов В.В.	113	Войцеховский А.В.	206	Жанкадамова А.М.	385
Алексеев А.В.	208	Волков С.В.	57, 315	Жданович Н.Е.	133, 427
Алентьев А.Ю.	161	Волочко А.Т.	368	Жубаев А.К.	359
Алонцева Д.Л.	344	Воробец В.С.	315	Жук Ю.	309
Аль-Муханна М.К.	452	Воронина Е.Н.	161	Журавлев М.В.	219
Аль-Сауд Т.С.М.	452	Воропай Е.С.	88, 407	Зажогин А.А.	330, 336
Аль-Ховайтер С.Х.	452	Вуйтик В.	300	Зажогин А.П.	86, 436, 462