

ТОМ 2, №4 (26)

ОКТАБРЬ - ДЕКАБРЬ 2018

ISSN 2618-7957

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И

ТЕХНОЛОГИИ

SPACECRAFTS & TECHNOLOGIES

КА «Гонец-М»

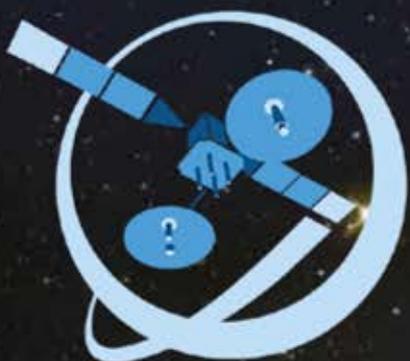
Производитель: АО «ИСС»



Технологическая платформа

НИСС

Национальная Информационная
Спутниковая Система



НИСС

Деятельность технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» направлена на скоординированное решение комплекса образовательных, научных, технических, технологических и экономических проблем создания и использования перспективных космических систем и комплексов.

Стратегической целью технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» является разработка совокупности «прорывных» технологий для:

- радикального повышения показателей пользовательских свойств космических аппаратов новых поколений и доступности персональных пакетных космических услуг;
- значительного расширения присутствия на мировых рынках высокотехнологичной продукции и услуг в космической, телекоммуникационной и других некосмических отраслях экономики.

Журнал является официальным научным изданием технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система».

Сайт ТП «НИСС»: tp.iss-reshetnev.ru

ISSN 2618-7957

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И ТЕХНОЛОГИИ

SPACECRAFTS &
TECHNOLOGIES

Том 2

№ 4 (26)

октябрь – декабрь 2018

Выходит один раз в три месяца

Красноярский край
Железногорск

2018

Космические аппараты и технологии

Главный редактор
Тестоедов Николай Алексеевич

чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, председатель редакционного совета
(Железногорск)

Заместитель главного редактора
Халиманович Владимир Иванович
канд. физ.-мат. наук, профессор (Железногорск)

Ответственный секретарь
Хныкин Антон Владимирович
канд. техн. наук (Железногорск)

Редакционный совет
Аннин Борис Дмитриевич
академик РАН, д-р физ.-мат. наук (Новосибирск)

Попов Гарри Алексеевич
академик РАН, д-р техн. наук (Москва)

Шабанов Василий Филиппович
академик РАН, д-р физ.-мат. наук (Красноярск)

Васильев Валерий Витальевич
чл.-кор. РАН, д-р техн. наук (Хотьково)

Махутов Николай Андреевич
чл.-кор. РАН, д-р техн. наук (Москва)

Псахье Сергей Григорьевич
чл.-кор. РАН, д-р физ.-мат. наук (Томск)

Шайдуров Владимир Викторович
чл.-кор. РАН, д-р физ.-мат. наук (Красноярск)

Чернявский Александр Григорьевич
(Королёв)

Гарин Евгений Николаевич
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)

Медведский Александр Леонидович
д-р физ.-мат. наук (Жуковский)

Овчинников Сергей Геннадьевич
д-р физ.-мат. наук, профессор (Красноярск)

Панько Сергей Петрович
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)

Пчеляков Олег Петрович
д-р физ.-мат. наук, профессор (Новосибирск)

Фатеев Юрий Леонидович
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)

Хартон Виктор Владимирович
д-р техн. наук, профессор (Королёв)

Чеботарев Виктор Евдокимович
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

Редакционная коллегия
Головёнкин Евгений Николаевич

д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

Двирный Валерий Васильевич

д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

Ковель Анатолий Архипович

д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

Косенко Виктор Евгеньевич

д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

Лопатин Александр Витальевич

д-р техн. наук (Красноярск)

Охоткин Кирилл Германович

д-р физ.-мат. наук, доцент (Железногорск)

Пономарев Сергей Васильевич

д-р физ.-мат. наук (Томск)

Матвеев Станислав Алексеевич

канд. техн. наук (Санкт-Петербург)

Непомнящий Олег Владимирович

канд. техн. наук, доцент (Красноярск)

Смотров Андрей Васильевич

канд. техн. наук (Жуковский)

Сухотин Виталий Владимирович

канд. техн. наук, доцент (Красноярск)

Хартон Станислав Викторович

канд. техн. наук (Красноярск)

Фернандес Кабальеро Антонио

профессор (Альбасете, Испания)

Нинкович Деян

д-р техн. наук (Белград, Сербия)

Ежеквартальный научный журнал

Издается с января 2012 года

ISSN 2618-7957

Издатель и учредитель:
Ассоциация «Технологическая платформа
«Национальная информационная спутниковая система»

Журнал «Космические аппараты и технологии» – рецензируемый научный журнал технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система». До 2018 года издавался под названием «Исследования наукограда».

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС77-72862 от 22.05.2018 г.)
Импакт-фактор РИНЦ за 2017 г. – 0,181.

«Космические аппараты и технологии» публикуют оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области космонавтики.

Тематические направления журнала:

- ракетно-космическая техника;
- новые материалы и технологии в космической технике;
- космическое приборостроение;
- космические услуги;
- инновации и экономика космической отрасли.

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях. Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (двойное слепое) рецензирование.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, scholar.google.com, www.cyberleninka.ru

Адрес редакции:
662972, Красноярский край,
ЗАТО г. Железногорск, ул. Ленина, 52
E-mail: isercit@gmail.com; <http://www.journal-niss.ru>

Адрес издателя:
662972, Красноярский край,
ЗАТО г. Железногорск, ул. Ленина, 52, корп. 4, ком. 224

Журнал распространяется по подписке через почтовые отделения (индекс 39491 в объединенном каталоге «Пресса России»).

Тираж 200 экз. Заказ 7418

Отпечатано Библиотечно-издательским комплексом Сибирского федерального университета
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-67; <http://bik.sfu-kras.ru>
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru

Spacecrafts & Technologies

Chief Editor

Testoyedov N. A.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Engineering,
Chairman of Editorial Board

Deputy Chief Editor

Khalimanovich V. I.

PhD in Physics and Mathematics, Professor

Executive Secretary

Khnykin A. V.

PhD in Engineering

Editorial Board

Annin B. D.

Academician of RAS, Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

Popov G. A.

Academician of RAS, Doctor of Engineering (Russia)

Shabanov V. Ph.

Academician of RAS, Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

Vasiliev V. V.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Engineering (Russia)

Makhutov N. A.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Engineering (Russia)

Psakhiy S. G.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

Shaidurov V. V.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

Cherniavsky A. G.

(Russia)

Chebotarev V. E.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Fateev Yu. L.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Garin E. N.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Khartov V. V.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Medvedtskiy A. L.

Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

Ovchinnikov S. G.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russia)

Panko S. P.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Pchelyakov O. P.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russia)

Editorial Staff

Dvirny V. V.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Fernández-Caballero Antonio

Professor (Spain)

Golovenkin E. N.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Khartov S. V.

PhD in Engineering (Russia)

Kosenko V. E.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Kovel A. A.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Lopatin A. V.

Doctor of Engineering (Russia)

Matveev S. A.

PhD in Engineering (Russia)

Nepomnyashy O. V.

PhD in Engineering, Associate Professor (Russia)

Ninković Dejan

Doctor of Engineering (Serbia)

Okhotkin K. G.

Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor (Russia)

Ponomarev S. V.

Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

Smotrov A. V.

PhD in Engineering (Russia)

Sukhotin V. V.

PhD in Engineering, Associate Professor (Russia)

Scientific quarterly journal

Published since 2012

ISSN 2618-7957

Publisher and Founder:

Association «Technology Platform

«National Information Satellite System»

«Spacecrafts & Technologies» is peer-reviewed scientific journal of Technology Platform «National Information Satellite System». Until 2018 was published under the title «The Research of the Science City».

The journal is registered by the the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (PI certificate no. FS77-72862, May 22, 2018).

The journal publishes original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in space.

The journal sections:

- Rocket and space equipment;
- New materials and technologies in space equipment;
- Space instrument engineering;
- Space Services;
- Innovation and economics of the space industry.

«Spacecrafts & Technologies» publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on www.elibrary.ru, scholar.google.com, www.cyberleninka.ru

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

- В. Е. Чеботарев, В. А. Деревянко, А. В. Макуха, М. Т. Бакиров**
КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПРЕЦИЗИОННОЙ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ
- Т. А. Zubov, А. А. Baskova, В. В. Sukhotin**
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВОГО РЕТРАНЛЯЦИОННОГО КОМПЛЕКСА НА СИГНАЛ
- М. С. Цимбал**
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В НЕГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРСОНАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

- П. А. Витязь, С. А. Ковалева, В. И. Жорник, М. А. Белоцерковский, А. Д. Дубинчук, Т. Ф. Григорьева, Н. З. Ляхов**
ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ КАРБИДОМ БОРА B_4C И МЕХАНОКОМПОЗИТОМ B_4C/W , ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ
- Г. Н. Чурилов, К. А. Финников, Н. С. Николаев**
АЛЬТЕРНАТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ РАКЕТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ кГц-РАЗРЯДА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЕ
- И. А. Тарасов, И. А. Яковлев, С. Н. Варнаков, С. М. Жарков, С. Г. Овчинников**
ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР Fe/Si В ПРОЦЕССЕ РОСТА
- Н. И. Афанасьев, О. К. Лепакова**
СИНТЕЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МАХ-ФАЗЫ Ti_3SiC_2 , СОДЕРЖАЩЕЙ БОРИДЫ

КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- О. П. Пчеляков**
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ: ИСТОРИЯ, СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ

ROCKET AND SPACE EQUIPMENT

- V. E. Chebotarev, V. A. Derevyanko, A. V. Makukha, M. T. Bakirov**
SPACE EXPERIMENT FOR PRECISION THERMAL STABILIZATION OF QUANTUM FREQUENCY STANDARDS FOR NAVIGATION SATELLITES
- T. A. Zubov, A. A. Baskova, V. V. Sukhotin**
FORMATION OF STRUCTURE COMPUTER MODEL FOR ASSESSMENT OF THE IMPACT PARAMETERS OF AN ONBOARD RELAYING COMPLEX ON A SIGNAL
- M. S. Tsimbal**
SPACECRAFT VELOCITY DETERMINATION IN NON-GEOSTATIONARY MOBILE SATELLITE COMMUNICATIONS

NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN SPACE EQUIPMENT

- P. A. Vityaz, S. A. Kovaleva, V. I. Zhornik, M. A. Belotserkovskii, A. D. Dubinchuk, T. F. Grigoreva, N. Z. Lyakhov**
POLYMER MATERIALS MODIFIED WITH BORON CARBIDE B_4C AND MECHANOCOMPOSITE B_4C/W FOR RADIATION PROTECTION IN SPACECRAFT
- G. N. Churilov, K. A. Finnikov, N. S. Nikolaev**
ALTERNATIVE DIRECTION OF DEVELOPMENT OF ROCKET PLASMA ENGINES BASED ON kHz DISCHARGE IN AN ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD
- I. A. Tarasov, I. A. Yakovlev, S. N. Varnakov, S. M. Zharkov, S. G. Ovchinnikov**
ELLIPSOMETRIC CONTROL OF PARAMETERS OF MULTILAYER Fe/Si NANOSTRUCTURES DURING GROWTH
- N. I. Afanasyev, O. K. Lepakova**
THE SYNTHESIS OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MAX-PHASE Ti_3SiC_2 CONTAINING BORIDES

SPACE INSTRUMENT ENGINEERING

- O. P. Pchelyakov**
SEMICONDUCTOR VACUUM TECHNOLOGIES IN SPACE: HISTORY, STATUS, PROSPECTS

КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПРЕЦИЗИОННОЙ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ

**В. Е. Чеботарев¹ ✉, В. А. Деревянко², А. В. Макуха²,
М. Т. Бакиров¹**

¹АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва»,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

²Институт вычислительного моделирования СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН,
г. Красноярск, Российская Федерация

Основой космических систем навигации являются высокостабильные атомные стандарты частоты, формирующие высокоточную спутниковую шкалу времени и высокостабильную сетку частот, обеспечивающие выходные точностные характеристики космических систем в целом. В основу системы прецизионной термостабилизации были положены следующие основные принципы: обеспечение пространственной неоднородности тепловых потоков на основании атомных стандартов частоты с использованием гипертеплопроводящих пластин; организация управляемых с высокой точностью дозированных тепловых воздействий обогревателей; повышение точности измерения температуры (абсолютных и относительных) с помощью бортового стандарта температуры.

Результаты лабораторного, наземного и космического эксперимента показали, что принцип прецизионной термостабилизации работает в части учета отклонения температуры от заданной и учета влияния нестабильности питания бортовой сети, также была обеспечена точность термостабилизации с учетом угла поворота солнечных батарей от 0,025 °С (на солнечных участках орбиты) до 0,04 °С (на теневых участках орбиты). Кроме того, при применении гипертеплопроводящих пластин улучшена пространственная нестабильность термоплиты в 6 раз. В итоге разработанные мероприятия позволяют повысить точность прецизионной термостабилизации до 0,01 °С.

Ключевые слова: космические навигационные системы, навигационный спутник, атомные стандарты частоты, прецизионная термостабилизация, гипертеплопроводящая пластина, космический эксперимент.

Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) находят широкое применение в навигационном обеспечении транспортных средств различного класса: наземного, водного, воздушного, космического [1; 2]. Основой космических навигационных систем являются высокостабильные атомные стандарты частоты (АСЧ), формирующие высокоточную спутниковую шкалу времени и высокостабильную сетку частот, обеспечивающие выходные точностные характеристики навигационных спутников и космической системы в целом [3]. Изменение температурных условий эксплуатации АСЧ при его функционировании в

составе космического аппарата (КА) в течение суток и более приводят к уходу его опорной частоты, который, в первом приближении, пропорционален изменению температуры. Характеристикой такого ухода служит такой параметр, как температурный коэффициент частоты (ТКЧ) [1; 2].

В обеспечении высоких требований по стабильности АСЧ вклад ТКЧ становится преобладающим (до $1 \cdot 10^{-13}$ о.е./градус). На данное время обеспечение прецизионной термостабилизации существующего АСЧ находится на уровне $\pm(0,1 \div 0,5)$ °С, доведение его до уровня 0,01 °С и менее – одна из основных задач системы терморегулирования КА [1].

В основу системы прецизионной термостабилизации (СПТ) были положены следующие основные принципы [4; 5; 7]:

- обеспечение пространственной неоднородности тепловых потоков на основании АСЧ

✉ chebotarev@iss-reshetnev.ru

© Чеботарев В. Е., Деревянко В. А., Макуха А. В., Бакиров М. Т., 2018

с использованием гипертеплопроводящих пластин (ГТП), имеющих эффективную теплопроводность $\geq (50 \div 100)$ теплопроводности алюминия;

- организация управляемых с высокой точностью дозированных тепловых воздействий обогревателей, учитывающих изменение внешнего теплового потока от вращающейся солнечной батареи (СБ) и изменение внутреннего теплового потока, обусловленного колебаниями напряжения питания;
- повышение точности измерения температур (абсолютных и относительных) с помощью бортового стандарта температуры (БСТ), использующего эффект стабильности температуры фазовых переходов плавящихся веществ.

1. Подготовка космического эксперимента на спутниках ГЛОНАСС по отработке системы прецизионной термостабилизации

Наземные и натурные испытания СПТ проводились АО «ИСС» и ИВМ СО РАН на основании Решения №110-01/10 «О подготовке, проведении и порядке финансирования работ космического эксперимента на базе гипертеплопроводящих пластин» Федерального космического агентства и МО РФ от 12.02.2010 г. Для его реализации была разработана программа по созданию составных частей СПТ и математических моделей их функционирования (ГТП, БСТ, ...), алгоритмов и программ управления процессом прецизионной термостабилизации [8–10].

Гипертеплопроводящая пластина

ГТП – это не новый материал со сверхвысокой теплопроводностью, а компактное тепловое устройство со сложной внутренней структурой, работающее по принципу тепловой трубы (ТТ), но в другом конструктивном исполнении (двухмерная плоская ТТ). Между двумя тонкими плоскими панелями размещается пористый материал, выполняющий роль фитиля, заполненный жидким теплоносителем. В пористой структуре имеются каналы для движения пара. При этом внутренняя структура фитиля и каналов такова, что теплоноситель способен перемещаться в любом направлении вдоль всей плоскости панели, обеспечивая перенос тепла. Одновременно с этим конструкция ГТП должна оставаться герметичной, прочной и обеспечивать дозированную заправку теплоносителем [1; 7].

Технология изготовления ГТП и их изготовление реализовано Уральским электрохимическим комбинатом, а разработка тепловой модели ГТП, технологии ее дозированной заправки и наземная тепловая отработка осуществлены

ИВМ СО РАН. Создано несколько вариантов конструктивного исполнения ГТП с использованием порошковых технологий из меди для применения в радиоэлектронной аппаратуре (в платах) и для АСЧ – размер $78 \times 364 \times 2,5$, масса 0,26 кг. В качестве теплоносителя для ГТП из меди используется вода. Испытания медных ГТП в термобарокамере подтвердили моделируемую зависимость перепада температуры ГТП и соответствующую эффективную теплопроводность от температуры области отвода тепла. С ростом температуры эффективность теплопередачи резко возрастает. При температуре более 25°C перепад температур не превышает 2°C . При этом эффективная теплопроводность достигает величины $17000 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$. Для ГТП из титана используется ацетон, но по тепловым характеристикам они хуже медных, однако легче их в два раза [6].

Бортовой стандарт температуры

Трудности создания прецизионных систем термостабилизации АСЧ во многом связаны с отсутствием высокоточных датчиков температуры, не имеющих дрейфа номинала в режиме длительного функционирования. Поэтому ИВМ СО РАН совместно с АО «ИСС» был разработан БСТ, предназначенный для обеспечения высокостабильной (реперной) температуры на борту КА, относительно которой могут быть измерены температуры всех элементов КА.

В основе работы БСТ лежит принцип стабильности температуры на границе раздела фаз рабочего вещества. Этот же принцип положен в основу Международной практической температурной шкалы (МПТШ-68), принятой на основе международных соглашений. При точности измерения температуры фазового перехода БСТ $\pm 0,001^\circ\text{C}$, точность поддержания градиентов температуры может быть доведена до $\pm 0,01^\circ\text{C}$.

В данном случае используется один из эвтектических сплавов Ga-In с температурой плавления $T_{пл} = 15,3^\circ\text{C}$ или Ga-Sn ($T_{пл} = 20,4^\circ\text{C}$). Особенностью эвтектических сплавов является равенство температур плавления и отвердевания, поэтому если образцовый температурный датчик помещается на границу (или вблизи границы) раздела фаз «жидкость–твердое тело», то его температура будет постоянна с высокой степенью точности. Задача устройства – поддержание существования стабильной границы раздела фаз.

Алгоритмы и программное обеспечение

Принцип действия системы динамической термостабилизации следующий. Сопанель отделяет прибор от теплового воздействия внешних потоков. При этом на одну (внутреннюю) сторону панели поступает суммарный тепловой поток от прибора и от компенсационного нагре-

вателя. На другую (внешнюю) сторону попадает внешний поток, кроме того эта поверхность излучает энергию во внешнее пространство [8].

Основная задача системы прецизионного терморегулирования заключается в том, чтобы удерживать температуру на внутренней поверхности в заданном интервале путем периодического кратковременного включения компенсационного нагревателя по показаниям датчиков температуры. Мощность компенсационного нагревателя должна быть сопоставима с мощностью внешнего теплового потока. Длительность импульса нагрева вычисляется по формулам теплового баланса в зависимости от отклонения температуры стабилизации основания АСЧ от заданного с учетом отклонения выделяемой мощности от средней.

Возникающие на основании АСЧ и на внутренней стороне соотопанели пространственные и временные неоднородности температуры сглаживаются в несколько раз при помощи ГТП.

Разработанные алгоритмы и программное обеспечение апробированы в процессе измерения теплофизических характеристик лабораторной модели АСЧ и при наземных испытаниях модуля системы прецизионной термостабилизации (МСПТ), создаваемого для космического эксперимента.

В состав МСПТ вошли: ГТП, БСТ, тепло-массовый имитатор АСЧ, обогреватели ГТП, блок коммутации нагревателями (БКН-Э).

2. Результаты космического эксперимента по отработке системы прецизионной термостабилизации

Запуск космического аппарата «Глонасс-М» №54 осуществлен 24.03.2014 г, включение МСПТ в работу прошло по штатной схеме.

Проводилась отработка получения всей доступной телеметрической информации по МСПТ за один виток со скважностью 5 минут.

БСТ показал устойчивую работу, однако в экспериментах опорная температура БСТ не использовалась для расчета температурных отклонений.

Выявлено гистерезисное влияние угла поворота СБ на ухудшение точности термостабилизации. Временная нестабильность на полностью солнечных участках орбиты не превышала $\pm 0,025$ °С. На теневых участках орбиты не превышала $\pm 0,065$ °С.

Было доработано программное обеспечение МСПТ с целью повышения точности термостабилизации с учетом влияния угла поворота СБ. Удалось сузить диапазон термостабилизации на теневых участках орбиты до уровня $\pm 0,04$ °С, а на полностью солнечных участках орбиты до диапазона $\pm 0,015$ °С.

По результатам анализа данных космического эксперимента разработаны мероприятия по повышению точности прецизионной термостабилизации до $\pm 0,01$ °С на всех участках орбиты:

- необходимо разработать алгоритмы термостабилизации на теневых участках орбиты;
- систему прецизионной термостабилизации необходимо дополнить измерением величины теплового потока путем измерения перепада температур на соотопанели;
- повысить точность измерения температур термодатчиками путем постоянной калибровки их по БСТ.

Заключение

Результаты лабораторного, наземного и космического эксперимента показывают:

- принцип прецизионной термостабилизации работает в части учета отклонения температуры от заданной и учета влияния нестабильности питания бортовой сети;
- обеспечена точность термостабилизации с учетом угла поворота солнечных батарей от $0,025$ °С (на солнечных участках орбиты) до $0,04$ °С (на теневых участках орбиты);
- при применении ГТП улучшена пространственная нестабильность термоплиты в 6 раз;
- разработаны мероприятия по повышению точности прецизионной термостабилизации до $0,01$ °С.

Список литературы

- [1] Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие ; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с., [24] с ил.
- [2] Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. В. Н. Харисова [и др.]. М. : Радиотехника, 2010. 800 с.
- [3] Косенко В. Е., Фаткулин Р. Ф., Звонарь В. Д., Ильин М. А., Чеботарев В. Е. Прецизионные космические платформы навигационных КА // Научно-технические технологии. 2017. Т. 18. № 12. С. 5–8.
- [4] Васильев Е. Н., Деревянко В. А., Нестеров Д. А., Косенко В. Е., Чеботарев В. Е. Вычислительное моделирование процессов теплообмена в системах терморегулирования космических аппаратов // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14. Вып. 6. С. 19–28.

- [5] Звонарь В. Д., Косенко В. Е., Бартенев В. А., Чеботарев В. Е., Васильев Е. Н., Деревянко В. А., Макуха А. В. Нестационарная тепловая модель и алгоритм управления системой термостабилизации атомного стандарта частоты навигационного КА «Глонасс-К» // Тез. докл. XV Междунар. научн. конф. «Системный анализ, управление и навигация». Украина, Евпатория. 2010. С. 101–102.
- [6] Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е., Мокляк В. И. Основные результаты космических экспериментов на КА «Глонасс-М» // Тез. докл. XV Междунар. научн. конф. «Системный анализ, управление и навигация». Украина, Евпатория. 2010.
- [7] Косенко В. Е., Деревянко В. А., Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е., Бакиров М. Т., Васильев Е. Н., Макуха А. В. Устройство термостабилизации радиоэлектронной аппаратуры. Пат. № 2408919, Российская Федерация, 2011, бюл. № 2.
- [8] Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е., Фаткулин Р. Ф., Деревянко В. А., Васильев Е. Н., Деревянко В. В. Пакет прикладных программ для моделирования тепловых режимов приборных панелей космического аппарата негерметичного исполнения // XVI Междунар. научн. конф. «Системный анализ, управление и навигация». Украина, Евпатория. 2011. С. 99–100.
- [9] Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Сунцов С. Б., Деревянко В. А., Васильев Е. Н., Нестеров Д. А. Применение гипертеплопроводящих структур при разработке негерметичных космических аппаратов повышенной мощности и ресурса // Тез. докл. XVII Междунар. научн. конф. «Системный анализ, управление и навигация». Украина, Евпатория. 2012. С. 20–22.
- [10] Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Сунцов С. Б., Чеботарев В. Е., Фаткулин Р. Ф., Бакиров М. Т., Деревянко В. А., Макуха М. В. Результаты применения гипертеплопроводящих структур в аппаратуре космических аппаратов // Тез. докл. XXI Междунар. научн. конф. «Системный анализ, управление и навигация». МАИ. 2016. С. 45–47.

SPACE EXPERIMENT FOR PRECISION THERMAL STABILIZATION OF QUANTUM FREQUENCY STANDARDS FOR NAVIGATION SATELLITES

V. E. Chebotarev¹, V. A. Derevyanko², A. V. Makukha², M. T. Bakirov¹

¹JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

²Institute of Computational Modelling SB RAS, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

The basis of space navigation systems are highly stable atomic frequency standards, which form a highly accurate satellite time scale and a highly stable frequency grid, providing output accuracy characteristics of space systems as a whole. To basis of the precision thermostabilization system is the following basic principles: ensuring the spatial heterogeneity of heat fluxes based on atomic frequency standards using hyper-heat-conducting plates; organization of high precision controlled thermal effects of heaters; improving the accuracy of temperature measurement (absolute and relative) using the onboard temperature standard.

The results of laboratory, ground-based and space experiments showed that the principle of precision thermostabilization works in terms of taking into account the deviation of temperature from a given one and taking into account the influence of instability of the on-board power supply, and the accuracy of thermostabilization was also ensured taking into account the angle of rotation of solar cells from 0,025 °C up to 0,04 °C (in the shadow areas of the orbit). In addition, the using of hyper-conductive plates improved spatial instability of the thermoplate 6 times. As a result, the developed measures make it possible to increase the accuracy of precision thermostabilization to 0,01 °C.

Keywords: space navigation systems, navigation satellite, atomic frequency standards, precision thermostabilization, hyper heat-conducting plate, space experiment.

References

- [1] Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of spacecraft design information support]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2011. 488 p. (In Russian)
- [2] Kharisov V. N., Perov A. I., Boldin V. A. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Construction principles and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010. 800 p. (In Russian)
- [3] Kosenko V. E., Fatkulin R. F., Zvonar V. D., Ilyin M. A., Chebotarev V. E. *Precizionnyye kosmicheskie platformy navigacionnyh KA* [Precision space platforms of navigation satellites] // Science-intensive technologies, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 5–8. (In Russian)

- [4] Vasilyev E. N., Derevyanko V. A., Nesterov D. A., Kosenko V. E., Chebotarev V. E. *Vychislitel'noe modelirovanie processov teploobmena v sistemah termoregulirovaniya kosmicheskikh apparatov* [Computational modeling of heat exchange processes in thermal control systems of spacecraft] // *Computational technologies*, 2009, vol. 14, issue 6, pp. 19–28. (In Russian)
- [5] Zvonar V. D., Kosenko V. E., Bartenev V. A., Chebotarev V. E., Vasilyev E. N., Derevyanko V. A., Makukha A. V. *Nestacionarnaya teplovaya model' i algoritm upravleniya sistemoy termostabilizacii atomnogo standarta chastoty navigacionnogo KA «Glonass-K»* [The non-stationary thermal model and control algorithm of the thermal stabilization system of the atomic frequency standard of the navigation satellite Glonass-K] // *Tezisy dokladov 15-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya»* [Abstracts of the 15th International Scientific Conference «System analysis, management and navigation»]. Evpatoria, 2010, pp. 101–102. (In Russian)
- [6] Zvonar V. D., Chebotaryov V. E., Moklyak V. I. *Osnovnye rezul'taty kosmicheskikh ehksperimentov na KA «Glonass-M»* [The main results of space experiments on the spacecraft Glonass-M] // *Tezisy dokladov 15-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya»* [Abstracts of the 15th International Scientific Conference «System analysis, management and navigation»]. Evpatoria, 2010. (In Russian)
- [7] Chebotarev V. E., Zvonar V. D., Kosenko V. E., Bakirov M. T., Derevyanko V. A., Makukha A. V., Vasilyev E. N. *Ustrojstvo termostabilizacii radioehlektronnoj apparatury* [The device thermal stabilization of electronic equipment]. Patent RU 2408919, 2011, bulletin no. 2.
- [8] Zvonar V. D., Chebotaryov V. E., Fatkulin R. F., Derevyanko V. A., Vasilyev E. N., Derevyanko V. V. *Paket prikladnykh programm dlya modelirovaniya teplovykh rezhimov pribornyh panelej kosmicheskogo apparata negermetichnogo ispolneniya* [Application software package for modeling thermal modes of instrument panels of unsealed spacecraft] // *Tezisy dokladov 15-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya»* [Abstracts of the 15th International Scientific Conference «System analysis, management and navigation»]. Evpatoria, 2011, pp. 99–100. (In Russian)
- [9] Kosenko V. E., Zvonary V. D., Suntsov S. B., Derevyanko V. A., Vasilyev E. N., Nesterov D. A. *Primenenie giperteploprovodyashchih struktur pri razrabotke negermetichnykh kosmicheskikh apparatov povyshennoj moshchnosti i resursa* [The use of hyper-heat-conducting structures in the development of leaky space vehicles of increased power and resource] // *Tezisy dokladov 17-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya»* [Abstracts of the 17th International Scientific Conference «System analysis, management and navigation»]. Evpatoria, 2012, pp. 20–22. (In Russian)
- [10] Kosenko V. E., Zvonary V. D., Suntsov S. B., Chebotarev V. E., Fatkulin R. F., Bakirov M. T., Derevyanko V. A., Makukha M. V. *Rezul'taty primeneniya giperteploprovodyashchih struktur v apparature kosmicheskikh apparatov* [The Results of Using Heat-Conductive structures in the apparatus of spacecraft] // *Tezisy dokladov 21-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya»* [Abstracts of the 21st International Scientific Conference «System analysis, management and navigation»]. MAI, 2016, pp. 45–47. (In Russian)

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВОГО РЕТРАНСЛЯЦИОННОГО КОМПЛЕКСА НА СИГНАЛ

Т. А. Зубов, А. А. Баскова, В. В. Сухотин ✉

Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Красноярский край, Российская Федерация

Важным этапом разработки бортового ретрансляционного комплекса является компьютерное моделирование, которое способно оценить влияние тех или иных параметров комплекса на сигнал. Статья посвящена разработке структуры компьютерной модели для оценки влияния параметров бортового ретрансляционного комплекса на сигнал. основополагающими узлами модели «наземная станция – бортовой ретрансляционный комплекс – наземная станция» являются узлы формирования воздействия, сквозной ретрансляции (реакции), анализа реакции. Рассмотрен принцип формирования сигнала стандарта DVB-S2 и приведена сигнально-кодовая конструкция. Раскрыта типовая структура бортового ретрансляционного комплекса, содержащая приемное и передающее антенно-фидерное устройство, входной и выходной мультиплексор, набор усилителей мощности. Разработана структура компьютерной модели, обладающая необходимым функционалом, а именно: отражением физической сути высокочастотного тракта бортового ретрансляционного комплекса и наземной станции на уровне основных узлов прохождения (смеситель, гетеродин, усилитель мощности, входной и выходной фильтры); возможностью изменения радиотехнических характеристик модели; формированием в модели испытательного сигнала с применением стандартов DVB-S2; измерением вероятности появления битовых ошибок при прохождении сигнала с различными сигнально-кодовыми конструкциями через модель; имитацией искажений сигнала в среде распространения.

Представлен план формирования модели в средах MATLAB/Simulink, состоящий из десяти пунктов. Сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: бортовой ретрансляционный комплекс, космический аппарат, компьютерное моделирование, сигнально-кодовые конструкции, DVB-S2, структурная схема, MATLAB/Simulink.

Введение

Бортовой ретрансляционный комплекс (БРК) космического аппарата (КА) связи является важнейшей составной подсистемой КА связи и, по существу, является полезной нагрузкой, определяющей его функциональное назначение [1]. Для обеспечения функционирования БРК выделяется основная часть главных ресурсов КА. В современных КА связи надежность и ресурс БРК определяют его срок службы. Важным этапом разработки БРК является компьютерное моделирование, которое способно оценить влияние тех или иных параметров комплекса на сигнал.

Кроме того, при моделировании должно быть рассмотрено функционирование БРК под действием различных искажений в канале связи, неидеальности характеристик высокочастотных (ВЧ) и низкочастотных (НЧ) трактов, вносящих искажения, влияния выбора той или иной сигнально-кодовой конструкции, определяющей показатели качества, такие как помехоустойчивость и пропускная способность.

Формирование структуры

Модель БРК должна быть адекватной оригиналу, она должна с достаточной точностью отображать интересующие характеристики. Основная функция комплекса со сквозной ретрансляцией состоит в приеме сигналов от наземных

✉ vsuhotin@sfu-kras.ru

станций (НС), усилении этих сигналов и последующей передаче их на другие НС с внесением при ретрансляции минимальных искажений и помех. Модель БРК можно воспринимать в единой системе с НС, где она формирует сигнал воздействия, на которое БРК вырабатывает реакцию, анализирующейся на другой НС. Схематичное представление такой модели показано на рис. 1.

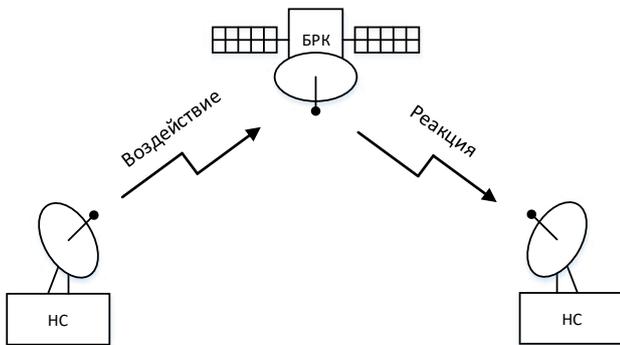


Рис. 1. Укрупненная схема модели НС-БРК-НС

Основополагающими узлами приемопередающей системы НС-БРК-НС являются узлы формирования воздействия, сквозной ретрансляции (реакции), анализа реакции. Рассмотрим более подробно эти узлы модели. Воздействие формируется в узлах НС как сигнально-кодовая конструкция, например соответствующая стандарту DVB-S2 [2–5]. Структурная схема формирования такого воздействия показана на рис. 2.

Входной поток данных разбивается на последовательность байт (т. н. таймслоты). В DVB-S2 таймслоты называются UP (UserPacket). Каждый UP проверяется на наличие ошибок дополнительным байтом четности CRC-8. Если входных по-

токов несколько, то формируется синхромаркер для UP каждого канала, а также буферизация для мультиплексирования с временным разделением UP с разных входных потоков в один выходной. Все это происходит в области «ModeAdaptation».

После ModeAdaptation UP-таймслоты представляются в виде единого потока GenericContinuousStream. Затем данный поток «режется» на блоки данных, которые называются DataField (поле данных) и к каждому DataField прикрепляется BB (Baseband) заголовок. Объединение BBHEADER с DataField формируют BBFRAME (Кадр BB), как это показано на рис. 3.

После данного разбиения идет скремблирование данных с «Псевдо Случайной Бинарной Последовательностью» для того, чтобы сделать появление логической единицы или логического нуля равновероятными.

Кодер с прямым исправлением ошибок (FEC) может формировать FECFRAME (кадр FEC) в двух режимах: short (короткий) и normal FECFRAME (обычный). Отличие кадров заключается в их длине: 16200 байт для короткого и 64800 для длинного. Для передачи «полезной» информации (видео, радио) используют нормальные фреймы. Для служебной информации, для которой критично время, используют короткие фреймы. Сначала входной BBFRAME проходит через BCH-кодер, а после через LDPC-кодер, формируя FECFRAME. Для короткого фрейма существует 10 режимов с различными скоростями для BCH и LDPC кодирования, для обычного – 11 вариантов (итого 21 вариант FEC кода), что необходимо для 3 режимов функционирования спутника: постоянная, переменная и адаптивная сигнально-кодовая конструкция.

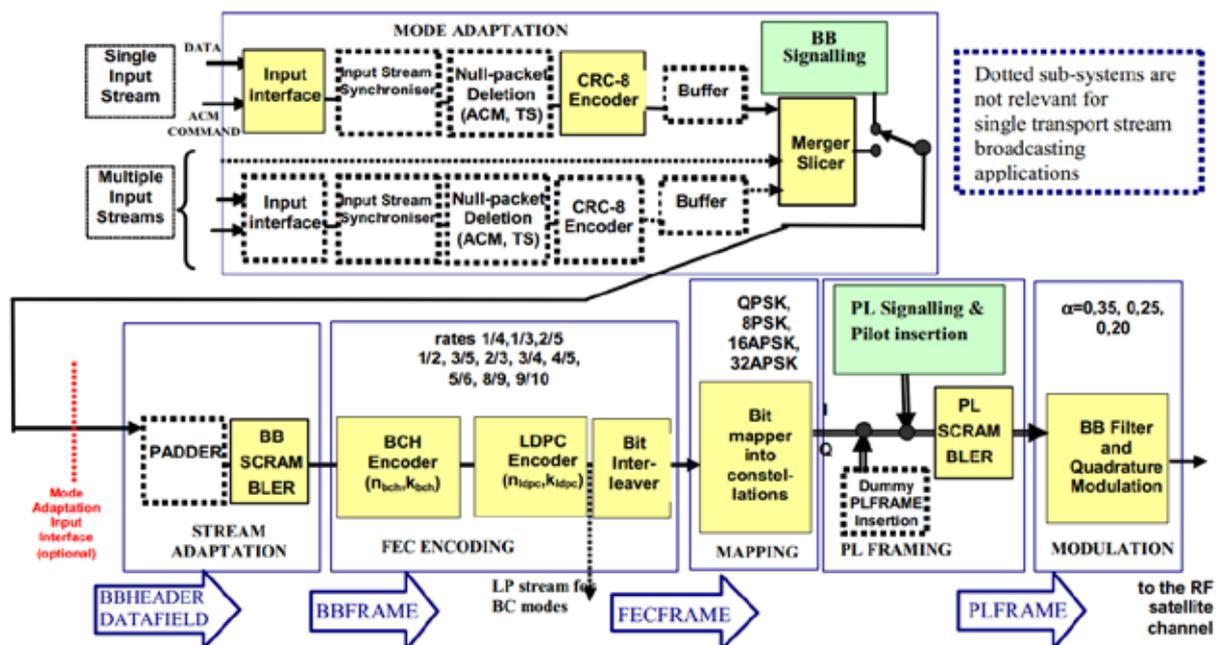


Рис. 2. Сигнально-кодовая конструкция в стандарте DVB-S2

После кодирования происходит битовое перемещение, т.е. распараллеливание битового потока в зависимости от выбора типа модуляции: QPSK (Quaternary Phase Shift Keying) – по 2 бита; 8PSK (Eighth Phase Shift Keying) – по 3 бита; 16APSK (Amplitude-Phase Shift Keying) – по 4 бита; 32APSK – по 5 бит. Затем данные опять синхронизируются и скремблируются. После этого, для ограничения полосы спектра, сигнал проходит фильтрацию – корень из приподнятого косинуса. Затем полоса сигнала фильтруется, усиливается и посредством конвертера переносится в область ВЧ.

Данный ВЧ-сигнал посредством влияния канала прохождения от НС до БРК ослабляется и искажается (аддитивные, фазовые, частотные шумы и т.д.). Принятый антенно-фидерным устройством (АФУ) сигнал поступает в приемное устройство, в котором осуществляется усиление сигналов с малым уровнем собственных флуктуационных помех (шумов), преобразование частоты (с $f_{пр}$ на $f_{прд}$). Далее сигналы поступают на входной мультиплексор (IMUX), в котором осуществляется выделение отдельных частотных стволов, принятых

единым групповым сигналом приемным АФУ и приемным устройством, затем сигналы каждого ствола усиливаются своим усилителем мощности (УМ) и складываются вместе особым устройством – выходным мультиплексором (OMUX). Типовая структура [1] современного многоствольного БРК со сквозной ретрансляцией для КА связи на геостационарной орбите представлена на рис. 4.

Далее ВЧ-сигнал (реакции), ослабленный и искаженный каналом, возвращается на НС. На наземной станции спектр принимаемого сигнала выделяется посредством полосового фильтра, усиливается малошумящим усилителем, переносится в область промежуточной частоты, где сигнал снова усиливается, фильтруется и переносится в область нулевой частоты. На нулевой частоте сигнал оцифровывается, фильтруется, демодулируется и декодируется в обратном порядке схемы на рис. 2. Во время обработки сигнала на приемной стороне восстанавливается частота, частота тактирования, битовая и кадровая синхронизация.

Таким образом, переданные данные для формирования ВЧ воздействия можно сравнить с при-

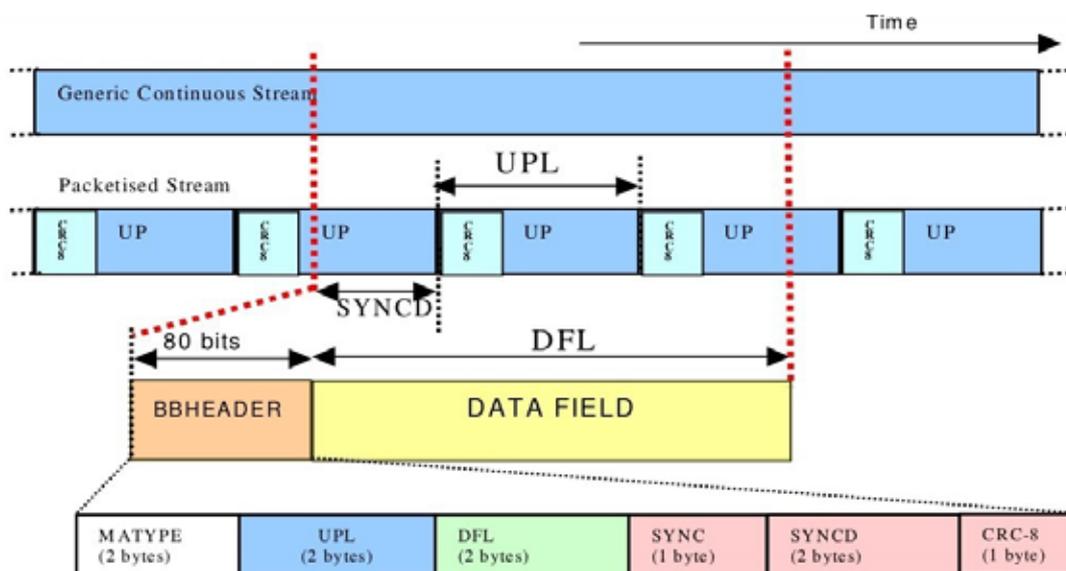


Рис. 3. Формирование BBFRAME DVB-S2

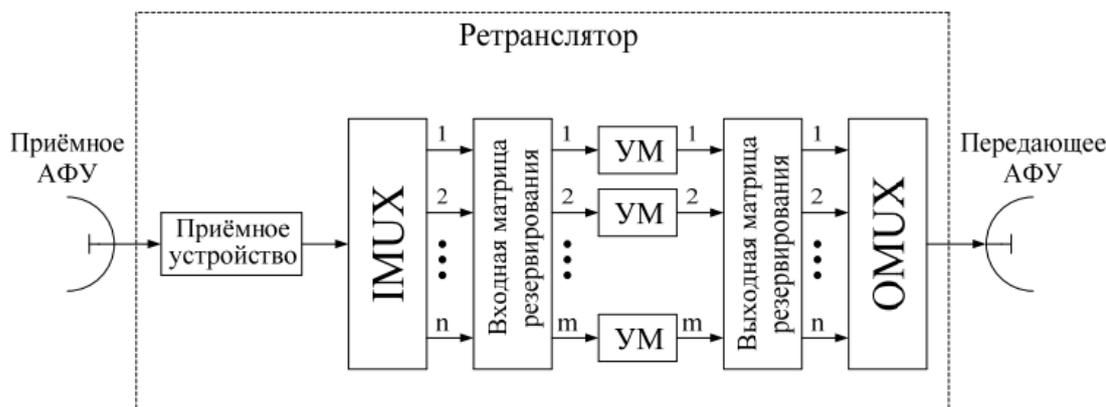


Рис. 4. Типовая структура [1] современного многоствольного БРК

нятыми декодированными данными реакции БРК. Критерием оценки для цифровых данных выступит вероятность появления ошибочного бита, посредством чего можно оценить качество используемого БРК. Также для большей достоверности можно анализировать отношение сигнала к шуму в разных точках модели и другие характеристики БРК. В качестве негативных факторов будут выступать аддитивный, тепловой, фазовый, частотный шум и прочие помехи. Структурная схема компьютерной модели для оценки влияния параметров БРК на сигнал будет выглядеть [6] как показано на рис. 5.

Компьютерная модель должна обладать следующим функционалом:

- отражение физической сути ВЧ тракта БРК и НС на уровне основных узлов прохождения (смеситель, гетеродин, усилитель мощности, входной и выходной фильтр);



Рис. 5. Структурная схема компьютерной модели для оценки влияния параметров БРК на сигнал

План формирования модели в средах MATLAB/Simulink [10–12] будет следующим:

1. На передающей стороне модели НС будет формироваться сигнально-кодированная конструкция посредством последовательно соединенных блоков Simulink, которые последовательно преобразовывают входные потоки данных в потоки UP (DVB-S2). Далее потоки UP будут преобразованы в кадры ВВ, которые будут подвержены каналному кодированию через последовательно стоящие кодеры BCH и LDPC, формирующие FEC-кадры. Затем перемежение FEC-кадров позволит сформировать констелляционное созвездие (QPSK, 8PSK, 16APSK и 32APSK).

2. На передающей стороне будут задаваться характеристики канала связи между моделями НС и БРК, который ослабляет сигнал, вносит аддитивную помеху, фазовый и частотный сдвиг.

3. Также на передающей стороне будет сформирована модель ВЧ тракта, в состав которой с неидеальными характеристиками будут входить: смеситель, усилитель мощности, входной и выходной фильтры.

4. Приемная сторона БРК будет принимать ВЧ сигнал, фильтровать его полосовым филь-

- возможность изменения радиотехнических характеристик модели;

- формирование в модели испытательного сигнала с применением стандартов DVB-S2;

- измерение вероятности появления битовых ошибок при прохождении сигнала с различными сигнально-кодированными конструкциями через модель;

- имитация искажений сигнала в среде распространения.

План формирования модели и выводы

Данная модель может быть реализована в пакете MATLAB/Simulink [7–9], затем полученная блок-схема конвертируется в текстовый MATLAB m-файл, который в последствии может быть интегрирован с программным обеспечением высокого уровня, разработанного в среде LabVIEW.

5. Выходящий сигнал с БРК будет проходить через блок модели канала, который внесет дополнительные искажения.

6. На приемной стороне ослабленный и искаженный сигнал будет проходить через модель гетеродинного приемника. Сигнал будет ограничен по полосе, усилен малошумящим усилителем, перенесен в область промежуточной частоты и т.д. Каждый ВЧ блок будет с неидеальными характеристиками.

7. Принятая и пониженная по частоте сигнально-кодированная конструкция будет последовательно детектирована в демодуляторе (QPSK, 8PSK, 16APSK и 32APSK), декодирована в LDPC и BCH кодерах, на выходе которых будет получен приемный поток данных ВВ, который будет восстановлен в последовательность данных.

8. Переданные и принятые данные будут проанализированы посредством расчета вероятности появления ошибочного бита.

9. Модель будет предусматривать возможность изменения характеристик сигнально-кодовой конструкции, высокочастотных трактов, каналов связи, таких как мощность, фаза, частота сигнала, мощность аддитивного, фазового и частотного шумов, характеристик скорости кодеров (в соответствии с DVB-S2), выбора модуляции (в соответствии с DVB-S2), нейтральности ВЧ филь-

тров, смесителей, усилителей и т. д.

10. Simulink-модель будет конвертирована в m-функции MATLAB для вызова их из среды LabVIEW.

Результаты компьютерного моделирования станут основой для формирования технических требований к отдельным блокам и в целом к разрабатываемому БРК.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки России в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (Соглашение № 14.578.21.0247 от 26.09.2017 г., уникальный номер проекта RFMEFI57817X0247).

Список литературы

- [1] Орлов А. Г., Севастьянов Н. Н. Бортовой ретрансляционный комплекс (БРК) спутника связи. Принципы работы, построение, параметры / науч. ред. В. Н. Бранец. Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. 206 с.
- [2] ETSI EN 302 307 V1.2.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2). ETSI, European Standard (Telecommunications series), 2009, 78 p.
- [3] Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / пер. с англ.; изд. 2-е, испр. М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
- [4] Морелос-Сарагаса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М. : Техносфера, 2005. 320 с.
- [5] Feoktistov D. S., Bondarenko V. N., Garifullin V. F., Krasnov T. V., Bogatyrev E. V. Narrow band interference immunity of correlation receiver with BOC and MSK-BOC modulation type // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2018. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317277
- [6] Зубов Т. А., Сухотин В. В. Выбор и обоснование среды моделирования бортового ретрансляционного комплекса космического аппарата // Тез. докл. XXI Всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярск. 2018. С. 204–207.
- [7] Lynn A., Smid E., Eshraghi M., Caldwell N., Woody D. Modeling hydraulic regenerative hybrid vehicles using AMESim and Matlab/Simulink. Orlando, Enabling Technologies for Simulation Science IX (Proceedings of SPIE), vol. 5805, 2005, pp. 24–40. doi: 10.1117/12.603712
- [8] Дьяконов В. П. VisSim + Mathcad + MATLAB. Визуальное математическое моделирование. М. : СОЛОН-Пресс, 2004. 384 с.
- [9] Дьяконов В. П. Simulink. Самоучитель. М. : ДМК Пресс, 2015. 782 с.
- [10] Дьяконов В. П. MATLAB R2007/2008/2009 для радиоинженеров. М. : ДМК Пресс, 2010. 976 с.
- [11] Communications System Toolbox. Проектирование систем связи на физическом уровне. М. : ЦИТМ Экспонента, 2015. 8 с.
- [12] Дьяконов В. П. Проектирование и моделирование СВЧ-устройств в MATLAB R2010 // Компоненты и технологии. 2011. № 6. С. 127–138.

FORMATION OF STRUCTURE COMPUTER MODEL FOR ASSESSMENT OF THE IMPACT PARAMETERS OF AN ONBOARD RELAYING COMPLEX ON A SIGNAL

T. A. Zubov, A. A. Baskova, V. V. Sukhotin

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Important development stage of an onboard relaying complex is computer simulation which is capable to estimate influence of these or those parameters of a complex on a signal. Article is devoted to development of structure of computer model for impact assessment of parameters of an onboard relaying complex

on a signal. Fundamental nodes of model a ground station – an onboard relaying complex – a ground station are nodes of forming of influence, through relaying (reaction), the analysis of reaction. In article the principle of forming of a signal of DVB-S2 standard is considered and signal and code construction is given. The standard structure of an onboard relaying complex containing the receiving and transmitting antenna feeder device, the input and output multiplexer, set of power amplifiers is disclosed. The structure of computer model having necessary functionality is developed namely: reflection of a physical essence of a high-frequency path of onboard relaying complex and ground station at the level of the main nodes of passing (the mixer, a heterodyne, the power amplifier, the inlet and outlet filter); possibility of change of radio engineering characteristics of model; forming in model of a measuring signal using the DVB-S2 standards; measurement of probability of emergence of bit errors when passing a signal with different signal and code constructions through model; simulation of signal distortions in the environment of distribution.

The plan of forming of model in the MATLAB/Simulink environments consisting of ten points is presented. The corresponding conclusions are drawn.

Keywords: onboard relaying complex, spacecraft, computer simulation, signal and code constructions, DVB-S2, block diagram, MATLAB/Simulink.

References

- [1] Orlov A. G., Sevastyanov N. N. *Bortovoj retranslyacionnyj kompleks (BRK) sputnika svyazi. Principy raboty, postroyeniye, parametry* [Onboard Relaying Complex (ORC) of the communication satellite. Principles of work, construction, parameters]. Tomsk, Publishing house of the Tomsk state university, 2014, 206 p. (In Russian)
- [2] ETSI EN 302 307 V1.2.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2). ETSI, European Standard (Telecommunications series), 2009, 78 p.
- [3] Sklyar B. *Cifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital communication. Theoretical bases and practical application]. Moscow, Izdatelskij dom Vilyams, 2003, 1104 p. (In Russian)
- [4] Morelos-Saragasa R. *Iskusstvo pomexoustojchivogo kodirovaniya. Metody, algoritmy, primeneniye* [Art of noiseproof coding. Methods, algorithms, application]. Moscow, Technosphere, 2005, 320 p. (In Russian)
- [5] Feoktistov D. S., Bondarenko V. N., Garifullin V. F., Krasnov T. V., Bogatyrev E. V. Narrow band interference immunity of correlation receiver with BOC and MSK-BOC modulation type // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2018. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317277
- [6] Zubov T. A., Sukhotin V. V. *Vybor i obosnovaniye sredey modelirovaniya bortovogo retranslyacionnogo kompleksa kosmicheskogo apparata* [The Choice and Justification of the Modeling Environment for an On-Board Relay Complex of a Spacecraft] // *Tezisy dokladov XXI Vserossiyskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Sovremennyye problemy radioelektroniki»* [Abstracts of the XXI All-Russia scientific and technical conference «Modern problems of radio electronics»]. Krasnoyarsk, 2018, pp. 204–207. (In Russian)
- [7] Lynn A., Smid E., Eshraghi M., Caldwell N., Woody D. Modeling hydraulic regenerative hybrid vehicles using AMESim and Matlab/Simulink. Orlando, Enabling Technologies for Simulation Science IX (Proceedings of SPIE), vol. 5805, 2005, pp. 24–40. doi: 10.1117/12.603712
- [8] Dyakonov V. P. *VisSim + Mathcad + MATLAB. Vizual'noe matematicheskoe modelirovaniye* [VisSim + Mathcad + MATLAB. Visual mathematical modeling]. Moscow, SOLON-Press, 2004, 384 p. (In Russian)
- [9] Dyakonov V. P. *Simulink. Samouchitel'* [Simulink. Self-instruction manual]. Moscow, DMK Press, 2015, 782 p. (In Russian)
- [10] Dyakonov V. P. *MATLAB R2007/2008/2009 dlya radioinzhenerov* [MATLAB R2007/2008/2009 for radio engineers]. Moscow, DMK Press, 2010, 976 p. (In Russian)
- [11] *Communications System Toolbox. Proektirovaniye sistem svyazi na fizicheskom urovne* [Communications System Toolbox. Design of communication systems at the physical level]. Moscow, TsITM of the Exhibitor, 2015, 8 p. (In Russian)
- [12] Dyakonov V. P. *Proektirovaniye i modelirovaniye SVCH-ustrojstv v MATLAB R2010* [Design and modeling of microwave devices in MATLAB R2010] // *Components and technologies*, 2011, no. 6, pp. 127–138. (In Russian)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В НЕГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРСОНАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

М. С. Цимбал ✉

АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва»,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

Измерение характеристик движения космического аппарата является важнейшей задачей для обеспечения функционирования любой спутниковой системы. На основании полученных координат и составляющих вектора скорости производится определение орбиты космического аппарата и прогнозирование его движения, необходимое для организации сеансов управления и связи. Однако, по причине неполной детерминированности орбиты из-за влияния гравитационных аномалий, сопротивления среды и других возмущающих сил, это прогнозирование нуждается в постоянном уточнении.

Определение траекторных параметров космических аппаратов традиционно осуществляется с использованием измерительных каналов радиотехнических систем с активным ответом, совмещенных с каналами передачи телеметрической и командной информации, с помощью средств наземного комплекса управления с привлечением специализированных командно-измерительных систем, комплексов и баллистического центра. Также известны способы траекторных измерений космического аппарата с применением глобальных навигационных спутниковых систем, что предполагает наличие на борту аппаратуры приема навигационных сигналов. Вместе с тем для существующих и перспективных космических систем различного назначения все более актуальным становится расширение областей автономного функционирования.

В статье рассмотрен способ определения скорости движения негеостационарного космического аппарата с многолучевой антенной системой без использования наземных измерительных средств. Проведена оценка погрешностей вектора скорости для метода непосредственного измерения радиальных скоростей объекта. Предложены меры по повышению точности определения скорости движения космического аппарата с использованием информации о местонахождении абонента.

Ключевые слова: эффект Доплера, доплеровский сдвиг, скорость космического аппарата, персональная спутниковая связь.

Введение

В общем случае точность определения положения и скорости объекта в пространстве зависит от комбинации типов используемых измерителей, ошибок измерений и расположения средств измерений относительно объекта [1–4]. Так, известно, что наибольшая точность метода определения вектора скорости в пространстве, основанного на непосредственном способе измерения трех радиальных скоростей объекта, достигается при таком взаимном расположении трех измерительных станций, при котором расстояния a (базы) между

станциями равны, то есть образуют равносторонний треугольник с отношением базы к высоте пирамиды равным [5]:

$$h/a = \frac{1}{\sqrt{6}} = 0,408.$$

Используя данное отношение применительно к существующим космическим системам, использующим разные типы орбит, можно оценить расстояние между измерителями, обеспечивающее наибольшую точность метода (табл. 1).

Из табл. 1 следует, что только для спутниковых систем на низкой круговой орбите возможна конфигурация с оптимальным расположением измерителей в пределах размеров земной поверхности. Данный тип орбит широко используется

✉ tsms@mail.ru

© Цимбал М. С., 2018

современными системами персональной спутниковой связи (Iridium, Globalstar), основу которых составляют КА с многолучевой антенной системой на базе активных фазированных решеток. Такие антенные системы позволяют организовать

на земной поверхности зону обслуживания диаметром 4600–5800 км, образованную независимыми лучами, число которых в случае системы Iridium достигает 48. При этом эквивалентная ширина диаграммы направленности (ДН) каждого луча

Таблица 1

Оптимальные расстояния между измерителями для различных спутниковых систем

Орбита	Орбитальная группировка	Высота h орбиты, км	Расстояние между измерителями, км
LEO	Iridium, Gonets, Globalstar	780...1500	1912...3674
MEO	GPS, ГЛОНАСС	18840...20180	46176...49460
HEO	Молния, Tundra	40000...47000	98039...115126

составляет $\pm 11...12^\circ$, а формируемая им зона обслуживания составляет около 650 км [5; 6].

Учитывая эти особенности, представляется возможным определять скорость движения космического аппарата бортовыми средствами в реальном масштабе времени путем проведения одновременных измерений доплеровских сдвигов частот сигналов в разнесенных абонентских каналах.

Из теории и практики применения многолучевых доплеровских измерителей вектора скорости известно, что при горизонтальном полете возможно определение вектора скорости летательного аппарата с проведением измерения частоты Доплера по двум лучам [6]. Данный способ можно считать приемлемым для задачи измерения вектора скорости КА, пренебрегая крайне незначительными изменениями его вертикальной составляющей (рис. 1).

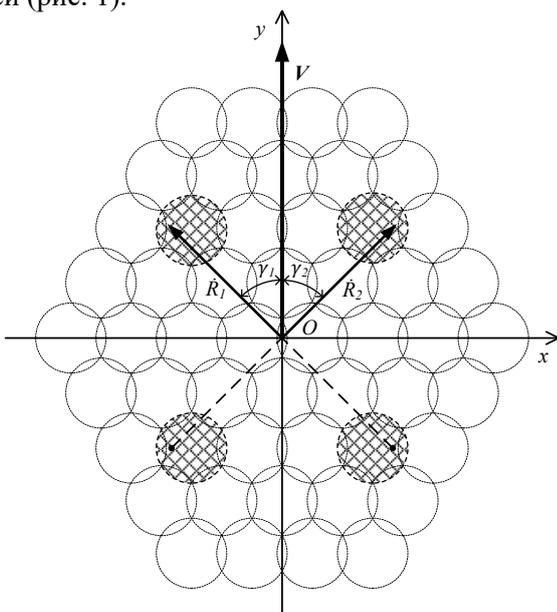


Рис. 1. Направления измерения доплеровских частот сигнала для КА с многолучевой антенной

Для V -расположения лучей, характеризующимся равенством углов $\gamma_1 = \gamma_2$, составляющие V_x, V_y определяются следующим образом:

$$V_x = \frac{\lambda_0}{4} \cdot \frac{f_{d1} + f_{d2}}{\cos \gamma_1}, \quad V_y = -\frac{\lambda_0}{4} \cdot \frac{f_{d1} - f_{d2}}{\sin \gamma_2},$$

где λ_0 – длина волны излучаемого сигнала; f_{d1}, f_{d2} – измеренные доплеровские частоты; γ_1, γ_2 – углы направления измерений.

Проведем потенциальную оценку точности определения скорости движения КА предлагаемым способом с учетом влияния возможных ошибок.

Учет возможных ошибок определения вектора скорости

При оценке точности определения вектора скорости в пространстве необходимо найти связь между составляющими вектора ошибки $\delta \vec{V}$ и тремя компонентами вектора скорости объекта \vec{V} , измеряемыми радиотехническими методами [7; 8].

Применительно к задаче определения скорости космического аппарата будем считать, что его перемещение осуществляется только в горизонтальном направлении ($V_z = 0$) и задача сводится к поиску значения и направления вектора скорости \vec{V} на плоскости. Так, расчетное значение вектора скорости будет определяться точкой пересечения прямых, перпендикулярных двум радиальным составляющим \vec{R}_1 и \vec{R}_2 (рис. 1). Направления вектора скорости \vec{V} и радиальные направления задаются относительно одной из координатных осей углами α_V и α_{R1}, α_{R2} . При этом имеющиеся ошибки измерения радиальных скоростей δR_1 и δR_2 ведут к возникновению погрешности полученного значения вектора скорости, который определяется отрезком OV' (рис. 2а).

Рассмотрев параллелограмм ошибок вектора скорости $VAV'B$, можно найти проекции вектора ошибки VV' на координатные оси δV_x и δV_y , которые составляют:

$$\begin{aligned} \delta V_x &= \frac{\delta V_{R1}}{\sin \gamma} \cos\left(\alpha_2 - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{\delta V_{R2}}{\sin \gamma} \cos\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{2}\right), \\ \delta V_y &= \frac{\delta V_{R1}}{\sin \gamma} \sin\left(\alpha_2 - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{\delta V_{R2}}{\sin \gamma} \sin\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (1)$$

Кроме этих ошибок, обусловленных неточным измерением величин радиальных составляющих, на результирующую точность определения вектора скорости также оказывают влияние ошибки, обусловленные неточным определением направления на объект (рис. 2б). При этом ошибки определения угла приводят к отклонению линии направления V_R на угол $\delta\alpha$ и возникновению линейной ошибки, которая составляет:

$$V \sin(\alpha_V - \alpha) \delta\alpha = V_t \delta\alpha,$$

где V_t – тангенциальная составляющая вектора скорости.

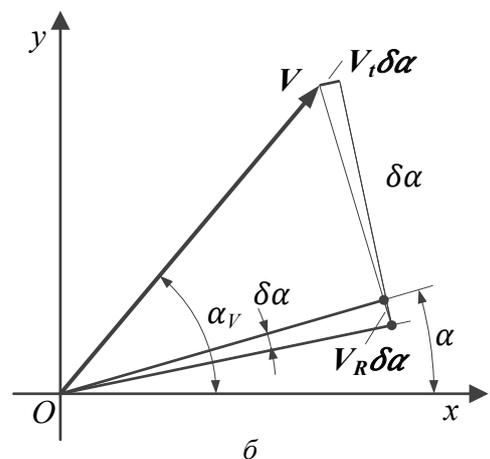
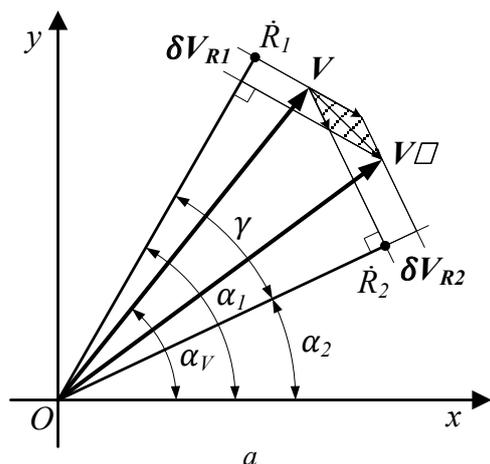


Рис. 2. Ошибки при измерении радиальной составляющей (а) и определении направления на объект (б)

Таким образом, линейная ошибка в направлении соответствующей стороны параллелограмма ошибок увеличивается в $1/\sin \gamma$ раз. С учетом этого фактора выражения (1) для ошибок в направлении осей X и Y примут вид:

$$\begin{aligned} \delta V_x &= \frac{\delta V_{R1} + V_t \delta\alpha_1}{\sin \gamma} \cos\left(\alpha_2 - \frac{\pi}{2}\right) - \\ &- \frac{\delta V_{R2} + V_t \delta\alpha_2}{\sin \gamma} \cos\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \delta V_y &= \frac{\delta V_{R1} + V_t \delta\alpha_1}{\sin \gamma} \sin\left(\alpha_2 - \frac{\pi}{2}\right) + \\ &+ \frac{\delta V_{R2} + V_t \delta\alpha_2}{\sin \gamma} \sin\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

Оценка точности определения скорости КА

Проведем оценку влияния ошибок измерения радиальных скоростей в двух, выбранных симметрично относительно вектора движения КА, направлениях (рис. 3).

С учетом симметричности выражения (2) принимают вид:

$$\begin{aligned} \delta V_x &= \frac{\delta V_R + V \sin(\alpha_V - \alpha) \delta\alpha}{\sin \gamma} \cdot \\ &\cdot \left[\cos\left(\alpha_2 - \frac{\pi}{2}\right) - \cos\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{2}\right) \right] \\ \delta V_y &= \frac{\delta V_R + V \sin(\alpha_V - \alpha) \delta\alpha}{\sin \gamma} \cdot \\ &\cdot \left[\sin\left(\alpha_2 - \frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{2}\right) \right] \end{aligned}$$

Результаты оценки точности измерения радиальных составляющих, в зависимости от угла γ между направлениями, представлены на рис. 4. При расчетах погрешность измерения радиальных составляющих, обусловленная аппаратной погрешностью и средой распространения сигнала, принималась равной $\delta V_{R1} = \delta V_{R2} = 1\%$, а ошибка направления – равной ширине диаграммы направленности $\delta\alpha = \pm 10^\circ$.

Полученные графики на рис. 4 показывают, что наибольшая точность определения скорости (по обеим осям) соответствует случаю, когда радиус-векторы пересекаются под прямым углом. При этом значительную долю погрешностей вносит ошибка, обусловленная неточностью измерения направления, которая имеет тенденцию к снижению при уменьшении угла между направлением измерения и истинным направлением векто-

ра скорости КА. Относительно высокое значение погрешности обусловлено неопределенностью местоположения абонента внутри зоны обслуживания, формируемой шириной луча.

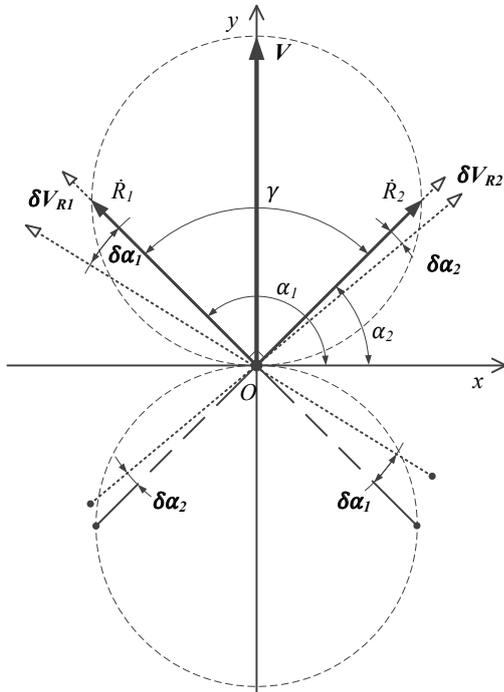


Рис. 3. Составляющие скорости движения КА с учетом возможных ошибок

На рис. 5 представлен график, отражающий вклад ошибки определения направления измерения в общую ошибку определения вектора скорости, по которому можно оценить возможность повышения точности для данного способа. Из графика следует, что для снижения результирующей

ошибки, вызванной неточным определением направления, до уровня принятой ошибки измерения радиальной составляющей, необходимо обеспечить погрешность определения направления измерения не более $0,4^\circ$.

Снижение этой неопределенности до столь малых значений путем уменьшения ширины ДН лучей представляется нецелесообразным, поскольку такой подход потребует многократного увеличения апертуры антенной системы. Наиболее привлекательным способом выглядит использование данных о местонахождении задействованного абонентского терминала. Так, в рассматриваемых спутниковых системах предусмотрено предоставление услуг по определению местоположения абонента автономными средствами, где при однократном измерении точность определения местоположения может достигать $\pm 1,6$ км [9; 10]. Использование этой информации, переданной на борт КА по служебному каналу, позволит значительно сократить (\sim в 200 раз) неопределенность направления доплеровского измерения $\delta\alpha$ внутри луча до уровня $0,12^\circ$, и получить, таким образом, ошибку направления измерения порядка $0,3\%$, что не превышает принятого значения ошибки измерения радиальной составляющей.

Дальнейшее снижение погрешности определения скорости КА рассматриваемым способом возможно с использованием глобальных навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС), что позволит получить более точные данные о местоположении абонента и, как следствие, свести к минимуму ошибку, вызванную неточным измерением радиальной составляющей.

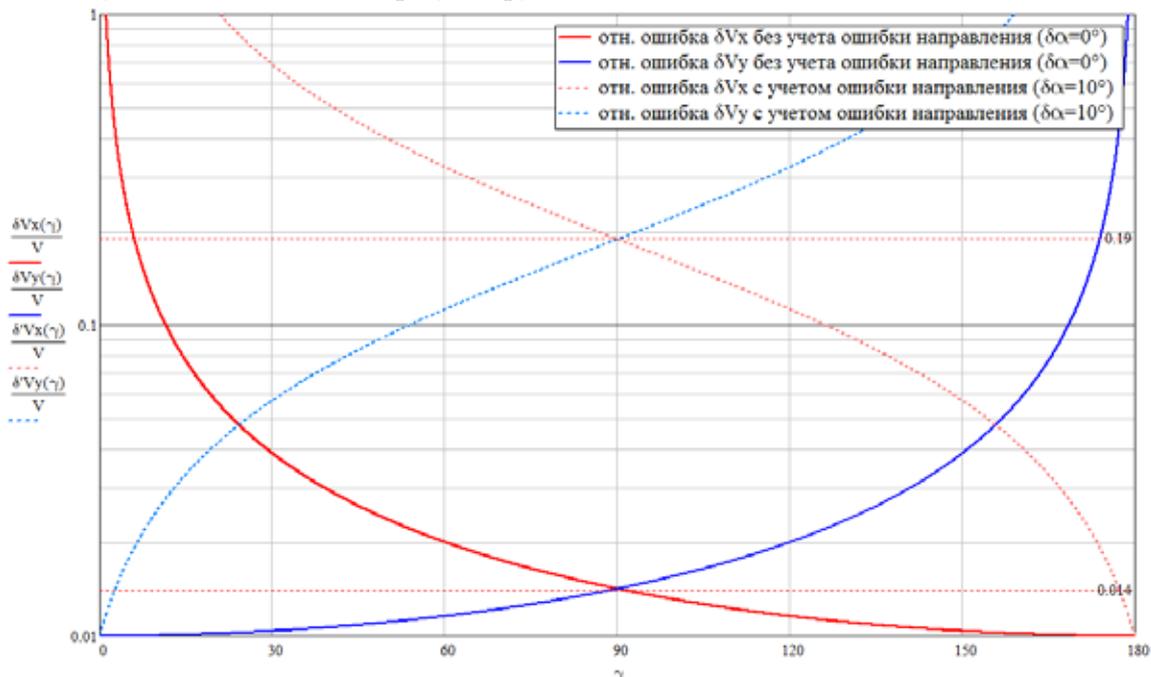


Рис. 4. Зависимость ошибок составляющих вектора скорости от угла между направлениями измерений

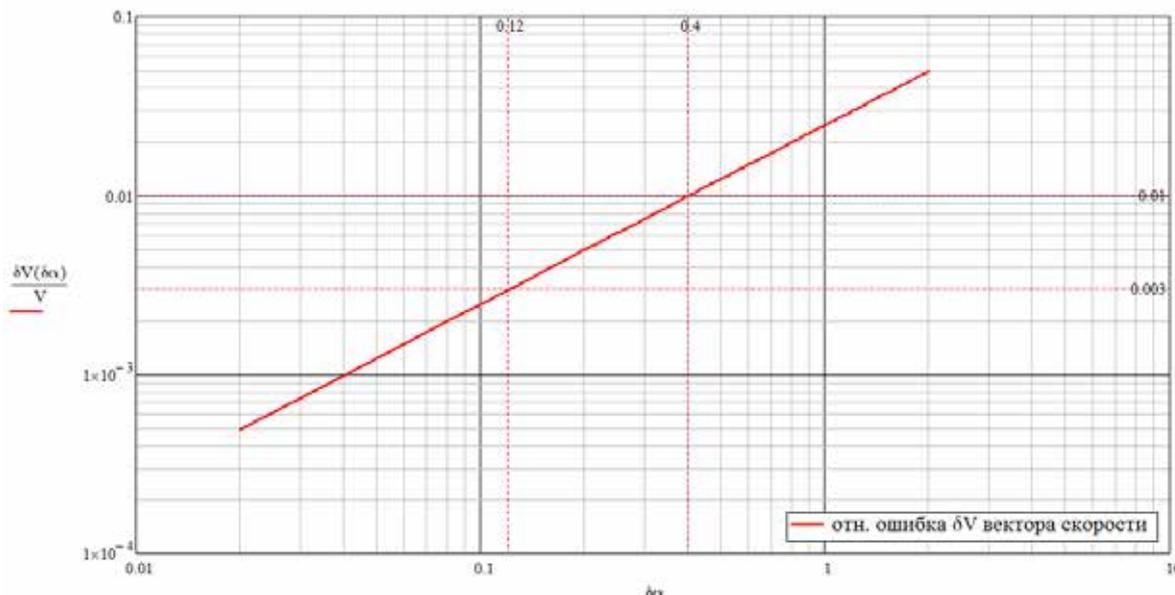


Рис. 5. Зависимость относительной ошибки вектора скорости от неопределенности направления измерения

Заключение

Проведена предварительная оценка достижимой точности определения скорости негеостационарного космического аппарата с использованием многолучевой антенной системы.

С помощью построенных зависимостей показано, что на результирующую точность определения вектора скорости КА преимущественное

влияние оказывают ошибки, обусловленные неточным определением направления КА–абонент.

Получены оценки, подтверждающие, что действенной мерой для снижения погрешности, вызванной неопределенностью положения источника излучения доплеровского сигнала, может оказаться использование информации о местоположении абонента.

Список литературы

- [1] Дудко Б. П. Космические радиотехнические системы : учеб. пособие. Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиозлектроники, 2012. 291 с.
- [2] Тузов Г. И. Выделение и обработка информации в доплеровских системах. М. : Сов. радио, 1967. 256 с.
- [3] Горчаковский А. А., Евстратко В. В., Мишуров А. В., Панько С. П., Рябушкин С. А., Сухотин В. В., Шатров В. А. Задачи и пути их решения в процессе создания командно-измерительных систем космических аппаратов // Исследования наукограда. 2015. № 4. С. 6–9.
- [4] Лысенко Л. Н., Бетанов В. В. Принципы и основные направления совершенствования наземного автоматизированного комплекса управления космическими полетами // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. № 1. С. 17–30.
- [5] Агаджанов П. А., Барабанов Н. М., Буренин Н. И. Космические траекторные измерения. Радиотехнические методы измерений и математическая обработка данных. М. : Сов. радио, 1969. 504 с.
- [6] Дятлов А. П. Системы спутниковой связи с подвижными объектами : учеб. пособие. Ч.1. Таганрог : ТРТУ, 2004. 95 с.
- [7] Камнев В. Е., Черкасов В. В., Чечин Г. В. Спутниковые сети связи. М. : Военный парад, 2010. 608 с.
- [8] Колчинский В. Е., Мондуровский И. А., Константиновский М. И. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов. М. : Сов. радио, 1975. 432 с.
- [9] Шебшаевич В. С., Дмитриев П. П., Иванцевич Н. В. Сетевые спутниковые навигационные системы. М. : Радио и связь, 1986. 408 с.
- [10] Сильверстов С. Д. Точность измерения космических аппаратов радиотехническими методами. М. : Сов. радио, 1970. 319 с.

SPACECRAFT VELOCITY DETERMINATION IN NON-GEOSTATIONARY MOBILE SATELLITE COMMUNICATIONS

M. S. Tsimbal

*JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation*

Measuring the motion characteristics of a spacecraft is the most important task in the operation of any satellite system. Based on the obtained coordinates and components of the velocity vector, the orbit of the spacecraft is determined and its motion predicted, which is necessary for organizing control and communications. However, due to the incomplete determinism of the orbit due to the influence of gravitational anomalies, the resistance of the medium and other disturbing forces, this prediction needs constant refinement.

Trajectory parameters of spacecraft are traditionally determined using measuring channels of radio engineering systems with an active response, combined with telemetry and command information transmission channels, using ground-based control complex with the involvement of specialized command and measurement systems, command-measuring complexes and a ballistic center. Also known are methods for trajectory measurements of a spacecraft using global navigation satellite systems, which presupposes the presence on board of the equipment for receiving navigation signals. At the same time, for existing and prospective space systems for various purposes, it is becoming increasingly important to expand the areas of autonomous operation.

The article describes a method for determining the velocity of a non-geostationary spacecraft with a multi-beam antenna system without using ground-based measuring instruments. The estimation of errors of the velocity vector for the method of direct measurement of the radial velocities of the object. Proposed measures to improve the accuracy of determining the velocity of the spacecraft using information about the location of the subscriber.

Keywords: Doppler effect, Doppler shift, spacecraft velocity, mobile satellite communications.

References

- [1] Dudko B. P. *Kosmicheskie radiotekhnicheskie sistemy* [Space Radio Systems]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2012, 291 p. (In Russian)
- [2] Tuzov G. I. *Vydelenie i obrabotka informacii v dopplerovskih sistemah* [Isolation and processing of information in Doppler systems]. Moscow, Sov. Radio, 1967, 256 p. (In Russian)
- [3] Gorchakovskiy A. A., Evstratko V. V., Mishurov A. V., Panko S. P., Ryabushkin S. A., Sukhotin V. V., Shatrov V. A. Tasks and their solutions in the process of developing control and measurement systems for spacecraft // *The Research of the Science City*, 2015, no. 4, pp. 6–9.
- [4] Lysenko L. N., Betanov V. V. *Principy i osnovnye i osnovnye napravleniya sovershenstvovaniya nazemnogo avtomatizirovannogo kompleksa upravleniya kosmicheskimi poletami* [Principles and Basic and Main Directions for Improving the Ground-based Automated Complex for the Control of Space Flights] // *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman. Ser. «Engineering»*, 2011, no. 1, pp. 17–30. (In Russian)
- [5] Agadzhanov P. A., Barabanov N. M., Burenin N. I. *Kosmicheskie traektornye izmereniya. Radiotekhnicheskie metody izmerenij i matematicheskaya obrabotka dannyh* [Cosmic Trajectory Measurements. Radio measurement methods and mathematical data processing]. Moscow, Sov. Radio, 1969, 504 p. (In Russian)
- [6] Dyatlov A. P. *Sistemy sputnikovoj svyazi s podvizhnymi ob"ektami* [Satellite communication systems with mobile objects]. Taganrog, TSURE, 2004, 95 p. (In Russian)
- [7] Kamnev V. E., Cherkasov V. V., Chechin G. V. *Sputnikovye seti svyazi* [Satellite communication networks]. Moscow, Military parade, 2010, 608 p. (In Russian)
- [8] Kolchinsky V. E., Mondurovsky I. A., Konstantinovskiy M. I. *Avtonomnye dopplerovskie ustrojstva i sistemy navigacii letatel'nyh apparatov* [Autonomous Doppler devices and navigation systems of aircraft]. Moscow, Sov. Radio, 1975, 432 p. (In Russian)
- [9] Shebshaevich V. S., Dmitriev P. P., Ivantsevich N. V. *Setevye sputnikovye navigacionnye sistemy* [Network satellite navigation systems]. Moscow, Radio and communication, 1986, 408 p. (In Russian)
- [10] Silverstov S. D. *Tochnost' izmereniya kosmicheskikh apparatov radiotekhnicheskimi metodami* [Accuracy of measurement of spacecraft by radio engineering methods]. Moscow, Sov. Radio, 1970, 319 p. (In Russian)

ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ КАРБИДОМ БОРА B_4C И МЕХАНОКОМПОЗИТОМ B_4C/W , ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

П. А. Витязь¹, С. А. Ковалева¹, В. И. Жорник¹,
М. А. Белоцерковский¹, А. Д. Дубинчук², Т. Ф. Григорьева³ ✉,
Н. З. Ляхов³

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

³Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

Композиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модифицированные наночастицами карбида бора B_4C и композита B_4C/W , для материалов защиты от быстрых и медленных (тепловых) нейтронов и γ -излучения сформированы методом механохимического синтеза в высокоэнергетических планетарных шаровых мельницах. Фазовый состав и микроструктурные характеристики композитов изучены методами рентгенографического фазового анализа (дифрактометр D8 Advance, Bruker), электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп CamScan 4) и инфракрасной Фурье-спектроскопии (Фурье-спектрометр Nicolet iS10).

Совместная механическая обработка в планетарной мельнице порошков сверхвысокомолекулярного полиэтилена и карбида бора B_4C приводит к формированию полимерных композиционных частиц чешуйчатой формы с хаотичным распределением в них частиц карбида бора и равномерным распределением нанокристаллического железа в матрице полимера (~ 9 масс. %). Кроме того, формируется структура карбида бора с меньшим содержанием углерода ($B_{6.5}C$), а также происходит разрыв молекулярных цепочек полиэтилена и его аморфизация.

Совместная обработка в планетарной мельнице сверхвысокомолекулярного полиэтилена и механокомпозита B_4C/W приводит к формированию полимерных композиционных частиц чешуйчатой формы с равномерным распределением в полимерной матрице частиц карбида бора и вольфрама. Изменяются параметры тонкой структуры карбида бора B_4C . В результате взаимодействия полимерной матрицы и дисперсных порошков модификатора происходит образование поперечно сшитых структур и деструкция полимера с уменьшением его молекулярной массы.

Ключевые слова: механохимические реакции, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, карбид бора B_4C , композит B_4C/W , рентгенографический фазовый анализ, электронная микроскопия, инфракрасная Фурье-спектроскопия.

Введение

На космических летательных аппаратах с ядерными энергетическими установками должны выполняться требования по радиационной без-

опасности космического полета [1]. Космическая среда практически не рассеивает нейтроны и γ -излучение.

Известно, что полиэтилен является хорошей защитой от быстрых нейтронов. При столкновении с атомами водорода нейтроны быстро теряют энергию, замедляются и становятся неспособными спровоцировать ионизацию. Для поглощения таких медленных нейтронов в полиэтилен добавляют бор, однако для надежной

✉ grig@solid.nsc.ru

© Витязь П. А., Ковалева С. А., Жорник В. И.,
Белоцерковский М. А., Дубинчук А. Д.,
Григорьева Т. Ф., Ляхов Н. З., 2018

защиты толщина полиэтилена должна быть не менее 10 см [2].

В настоящее время разработан сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), представляющий собой линейный полимер с очень длинными цепями, не имеющими боковых ответвлений, с молекулярной массой от 1 500 000 до 10 500 000. СВМПЭ, благодаря высоким значениям молекулярной массы, обладает рядом достоинств, в числе которых хорошие антифрикционные свойства, высокая ударопрочность, стойкость к растрескиванию под напряжением в коррозионных и влажных средах, а также при повышенной температуре, стабильность размеров, стойкость к истиранию и γ -излучению, что делает его перспективным материалом в ряде приложений. Одним из методов, позволяющих существенно повысить механические характеристики СВМПЭ для применения в нагруженных конструкциях и получать необходимое сочетание физико-механических, трибологических и теплофизических свойств для его использования в узлах трения, является дисперсное упрочнение и получение полимерных композиционных материалов [3].

Физико-механические свойства композиционных материалов на основе полимеров являются структурно чувствительными и определяются атомным, молекулярным и надмолекулярным строением вещества. При этом основополагающую роль играют фазовое состояние и степень дисперсности наполнителя, его распределение в матрице, межфазная поверхность и процессы взаимодействия на границе между частицами дисперсной фазы и полимерной средой [4]. В то же время высокая молекулярная масса СВМПЭ накладывает ограничения на методы его переработки, в частности, его переработка экструзией и литьем затруднена из-за высокой вязкости расплава.

Применение непосредственно наноразмерных наполнителей, например, вольфрама и карбида бора, затруднено из-за технологических особенностей, обусловленных агломерацией наночастиц, плохой смачиваемостью и слабой адгезией наполнителя, а также низким показателем текучести расплава полимера вследствие его высокой молекулярной массы. Перспективным является метод формирования композитов на основе СВМПЭ, базирующийся на механохимическом взаимодействии СВМПЭ с соединениями-модификаторами (например, карбидом бора, вольфрамом) [5; 6]. Механическая активация (МА) полимера с соединениями бора и их композитами с вольфрамом может приводить к изменению как его надмолекулярной структуры с уменьшением молекулярной массы, так и изменению молекулярного строения без разрыва внутримолекуляр-

ных связей [7], в условиях высоких напряжений, связанных с внешними нагрузками. Проявляется также и структурная нестабильность карбида бора [8].

Механическая активация приводит к увеличению плотности, модуля упругости и одновременно к снижению коэффициента трения и предела текучести материала [7].

Целью данной работы является исследование процессов формирования микроструктуры полимерных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и микрокристаллических порошков карбида бора и его композитов с вольфрамом в ходе механической активации.

Материалы и методы

При изготовлении композитов состава полимер/ B_4C и полимер/ B_4C/W в качестве исходного матричного материала использовали порошок сверхвысокомолекулярного полиэтилена марки GUR 4120 производства Ticona GmbH (Германия), с молекулярной массой $4 \cdot 10^6$ г/моль и размером сферических частиц 100–160 мкм. Модификатором являлся карбид бора B_4C со средним размером частиц 100–160 мкм.

В качестве второго модификатора был взят высокодисперсный механокомпозит B_4C/W , предварительно полученный механохимическим синтезом (МС) из порошков карбида бора B_4C (средний размер частиц 40–60 мкм) и вольфрама марки ПВТ (размер частиц 4–6 мкм) в массовом соотношении 50:50, в высокоэнергетической планетарной шаровой мельнице АГО-2 с энергонапряженностью 7 Вт/г, в защитной атмосфере аргона, длительность обработки составляла 4 мин.

Формирование композитов полимер/модификатор (весовое содержание полимера 10 %) осуществляли путем механохимического синтеза в планетарной шаровой мельнице «Активатор 2S» с водяным охлаждением в воздушной атмосфере. Объем барабана 250 см³, диаметр стальных шаров 9 мм, загрузка 370 г, навеска обрабатываемого образца 40 г, скорость вращения барабанов вокруг общей оси ~ 600 об/мин. Длительность обработки составляла 5, 10 и 25 мин.

Рентгенографические измерения выполняли на дифрактометре D8 Advance (Bruker, Германия) с использованием характеристического излучения медного анода рентгеновской трубки CuK_α . Расчет и уточнение профильных и структурных параметров выполняли по методу наименьших квадратов с проведением полнопрофильного анализа дифрактограмм. Исследования микроструктурных характеристик (размер кристаллитов L и микронапряжения ε) проводили с использованием «дубль-Фойгт» (double Voigt) методологии. Для разделения вкладов

в уширение пиков от L использовали функцию Лоренца, от микронапряжений ε – функцию Гаусса. Исследование микроструктуры и химического состава получаемых композитов выполняли на сканирующем электронном микроскопе «CamScan 4» (Oxford Instruments, Англия). ИК исследования проводили с использованием ИК Фурье-спектрометра Nicolet iS10 (Thermo Scientific, США) методом нарушенного полного внутреннего отражения на кристалле алмаза в диапазоне частот 4000–400 см⁻¹.

206

Результаты и обсуждение

1. Система СВМПЭ + В₄С

В результате совместной интенсивной механической обработки полимера и порошка карбида бора в течение 5–25 мин. рентгено-графически регистрируемый фазовый состав образцов представлен основными кристаллическими фазами карбидов бора В₄С [№ 35–0798] (пространственная группа R3m) и В₁₀С [№ 44–1206] (R3m), железа α -Fe [№ 06–0696] и СВМПЭ [№ 40–1995] в базе рентгенографических порошковых стандартов JCPDS PDF2. На начальной стадии МС (в течение 5 мин.) регистрируется фаза углерода С (рис. 1, кривая 1), которая исчезает с увеличением длительности обработки до 10 мин. и более. Механическая активация способствует уменьшению размеров кристаллитов карбидных частиц (до ~ 150 нм), однако параметры структуры изменяются незначительно: $\Delta a = 0,003 \text{ \AA}$, $\Delta c = 0,007 \text{ \AA}$ (табл. 1), что может быть обусловлено колебаниями в содержании углерода (~ 19,3 ат. %. [7]). Высокая абразивная способность карбида бора приводит к появлению нанокристаллического железа (до ~ 9 масс. %) с размерами кристаллитов $L_{\text{Fe}} = 21\text{--}18 \text{ нм}$ в составе смеси. СВМПЭ является аморфно-кристаллическим полимером, в котором в исходном состоянии кристаллическая структура представлена орторомбической фазой с пространственной группой Pnam (62). С увеличением длительности МС до 25 мин. снижается интенсивность пиков кристаллической части (110) и (200) и растет интенсивность аморфных гало, что может свидетельствовать об аморфизации полимера.

По данным фракционного анализа на начальном этапе МС происходит измельчение частиц карбида бора вплоть до размеров менее 40 мкм (рис. 2). Одновременно происходит формирование композитов с преимущественным содержанием полимера. Наблюдается высокая деформация исходных частиц полимера и образование чешуйчатых «зерен». С увеличением длительности обработки размер композиционных частиц увеличивается за счет процессов пластического деформирования и спекания.

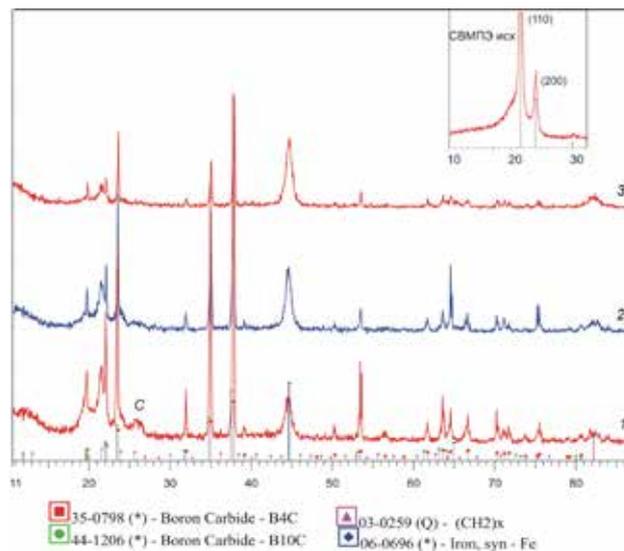


Рис. 1. Дифрактограммы исходного СВМПЭ (на врезке) и композитов СВМПЭ/В₄С после механической обработки в течение 5 (1), 10 (2) и 25 (3) мин.

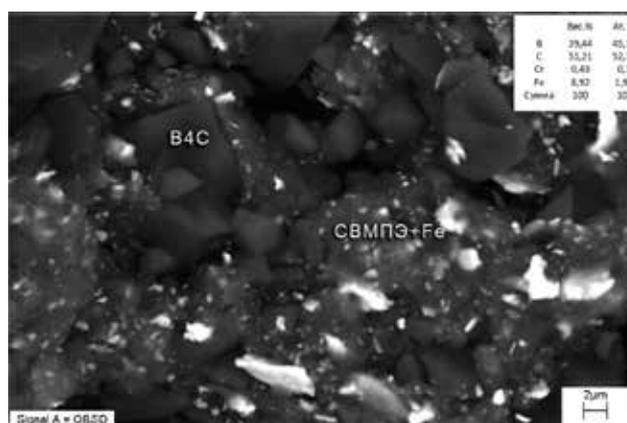


Рис. 2. СЭМ изображение композита СВМПЭ/В₄С, полученного механической активацией в течение 25 мин.

Таблица 1

Микроструктурные параметры фаз СВМПЭ/В₄С

	5 мин.	10 мин.	25 мин.	
В ₄ С	a (Å)	5,603	5,601	5,600
	c (Å)	12,084	12,067	12,077
	L (нм)	>200	145	149
α -Fe	a (Å)	2,874	2,871	2,871
	L (нм)	21	19	18

После 25 мин. МА частицы карбида бора измельчаются до уровня 1–5 мкм, при этом они рас-

пределены хаотично в объеме СВМПЭ, в то время как частицы железа распределены в нем равномерно. Частицы карбида бора (~ 5 мкм) имеют выраженную границу раздела с полимером, свидетельствующую о том, что между различными компонентами порошковой композиции достаточно прочные связи не образуются.

Результаты исследования химических связей в СВМПЭ и карбиде бора в композиционных частицах методами ИК-спектроскопии представлены на рис. 3. На всех спектрах полученных образцов регистрируются полосы поглощения, характерные для СВМПЭ, такие, как ду-

блет 2913 cm^{-1} и 2846 cm^{-1} , отвечающий за симметричные и асимметричные валентные колебания C–H, дублет 1468 cm^{-1} и 1458 cm^{-1} , отвечающий за деформационные колебания C–H, и полосы кристалличности 730 cm^{-1} и 719 cm^{-1} . Однако их интенсивность значительно снижена уже после 5 мин обработки с появлением дополнительного плеча в сторону низкочастотной области, а после 25 мин. MC с формированием плеча полосы 730 cm^{-1} , что обусловлено потерей кристалличности. С увеличением длительности MC до 25 мин. происходит также формирование и рост диффузных полос в диапазонах 1450–1600 и 3000–3300 cm^{-1} . Полосы,

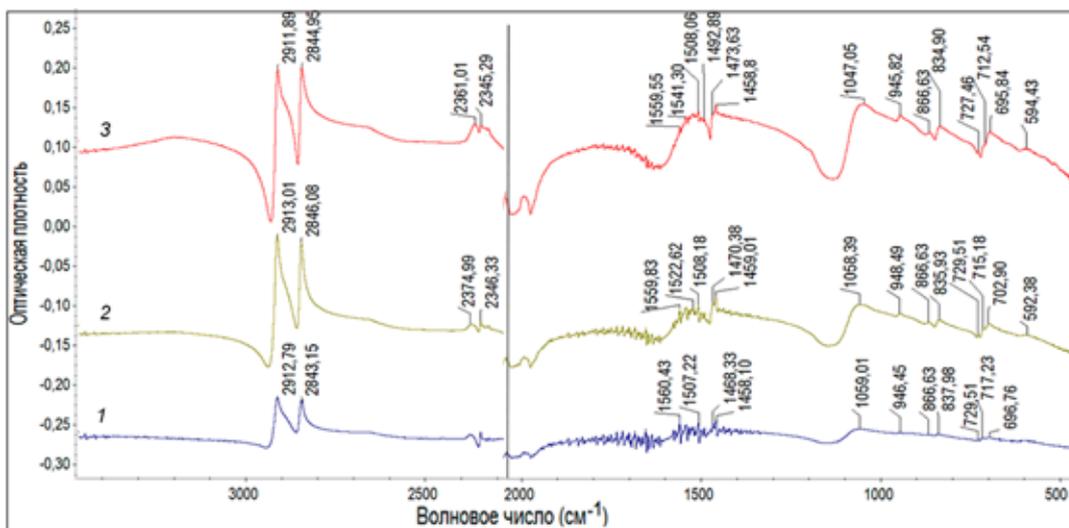


Рис. 3. ИК Фурье-спектры композитов СВМПЭ/ B_4C , полученных в результате механохимического синтеза в течение 5 (1), 10 (2) и 25 (3) мин

отвечающие связям –ОН и C–O, которые указывали бы на окислительную деструкцию полимера, не регистрируются.

Одновременно в спектрах присутствуют характерные полосы поглощения карбида бора, которые соответствуют B–C валентным колебаниям: 1059 cm^{-1} (ν_{as} C–B₃), 946 cm^{-1} (ν_s C–B₃), 866 и 837 cm^{-1} .

Карбид бора можно рассматривать как своеобразную фазу внедрения атомов углерода в пустоты упаковки икосаэдров бора, близкой к плотной [9]. Различаются две структурные конфигурации: богатое углеродом соединение $B_{4,3}C$ и промежуточное соединение $B_{6,5}C$. При этом содержание углерода в карбиде будет влиять на положение полос поглощения связи B–C, которые чувствительны к ближнему порядку. С уменьшением содержания углерода они сдвигаются в низкочастотную область, что, возможно, обусловлено искажением симметрии октаэдра B_4C при повышении концентрации углеродных вакансий. Так, полоса ~ 1600 cm^{-1} приписывается асимметричным валентным колебаниям ν_{as} C–B–C, а полоса 410 cm^{-1} – деформационным колебаниям C–B–C в структуре соединения $B_{6,5}C$. Появление полос

при 380 и 1450 cm^{-1} имеет место в более богатых бором композициях в качестве новых мод, возникающих при растяжении и изгибе связей, которые содержат атом C в центральном узле B–C–B или C–C–C [8; 10]. После механической обработки следует отметить появление ряда полос поглощения в диапазоне 1450–1600 cm^{-1} , интенсивность которых с увеличением длительности обработки растет, и которые смещаются в низкочастотную область спектра, что обусловлено структурной нестабильностью карбида бора при высоких напряжениях, связанных с внешними нагрузками, и появлением неупорядоченной фазы. Можно предположить, что при MC происходит обеднение карбида бора углеродом.

В то же время широкая полоса в диапазоне 1130–1458 cm^{-1} , интенсивность которой также увеличивается к 25 мин. MC, может быть обусловлена валентными колебаниями B–O–C, а также валентными колебаниями B–O (1380–1310 cm^{-1}). Увеличение длительности MC до 25 мин. приводит также к появлению широкой полосы поглощения в диапазоне 3100–3300 cm^{-1} , которая соответствует B–OH валентным колебаниям. Поскольку МА проводится в воздушной атмосфере, влажность ко-

торой может достигать 70 %, к радикалам, образованным в результате высоких температур и давления в пятне контакта, присоединяется группа OH.

Таким образом, механическая обработка в планетарной мельнице порошков СВМПЭ и карбида бора B_4C с размером частиц 100–160 мкм приводит к формированию полимерных композиционных частиц чешуйчатой формы примерно такого же размера с хаотичным распределением в них частиц карбида бора с размером 1–5 мкм и равномерно распределенным в матрице полимера нанокристаллическим железом в количестве ~ 9 масс. %, появившимся в результате интенсивного намола. МА способствует формированию структуры карбида бора с меньшим содержанием углерода ($B_{6,5}C$). Спирты или другие соединения не образуются, что косвенно указывает на отсутствие существенной окислительной деструкции полимера. При механохимическом синтезе происходит разрыв молекулярных цепочек СВМПЭ и его аморфизация.

2. Система СВМПЭ + B_4C/W

В первую очередь представляет интерес микроструктура полученного механокомпозиата карбид бора/вольфрам. По данным рентгеновского фазового анализа ICDD PDF2 (рис. 4) композит содержит вольфрам (SG Im-3m (229)) с размером кристаллитов $L_W \sim 37$ нм и карбида бора B_4C и $B_{10}C$ (R3m (166)). В результате механической активации в стальных барабанах стальными шарами в смеси появляется фаза железа (Im-3m (229)) с размерами кристаллитов $L_{Fe} \sim 8$ нм в количестве ~ 4 масс. %. По сравнению с данными картотеки параметры тонкой структуры B_4C (№ 35–0798, $a = 5,6003$ Å, $c = 12,086$ Å) изменяются ($\Delta a = +0,004$ Å; $\Delta c = +0,018$ Å) (табл. 2), что может быть обусловлено снижением содержания углерода (~ 18 ат. %) [8]. Размер кристаллитов составляет $L_{B_4C} \sim 46$ нм. Изменений в структуре вольфрама не обнаружено.

При механохимическом синтезе композита СВМПЭ/ B_4C/W с длительностью до 25 мин. рентгенографически регистрируемый фазовый состав существенно не изменяется. Исходный СВМПЭ является аморфно-кристаллическим полимером, в котором кристаллическая структура представлена орторомбической фазой с пространственной группой Pnam (62). Интенсивность рефлексов СВМПЭ значительно снижается уже после 5 мин. МА (рис. 4), а гало от аморфной части полимера не регистрируется. Дальнейшей фрагментации частиц вольфрама и карбида бора в процессе обработки не происходит. Размер кристаллитов для вольфрама сохраняется на уровне $L_W \sim 35$ –37 нм, а для карбида бора он возрастает до уровня $L_{B_4C} \sim 60$ –87 нм (табл. 2). Наибольшие изменения в структуре претерпевают железо и

карбид бора. Параметр a решетки железа возрастает с 2,866 до 2,879 Å, что, возможно, связано с образованием твердых растворов. Его количество в полимерном композите увеличивается до 5 масс. %. По сравнению с данными № 35–0798 картотеки, параметры тонкой структуры B_4C изменяются ($\Delta a = +0,009$ Å; $\Delta c = -0,008$ Å), что может быть обусловлено увеличением количества углерода в карбиде с 18 до 19,6 ат. % [8].

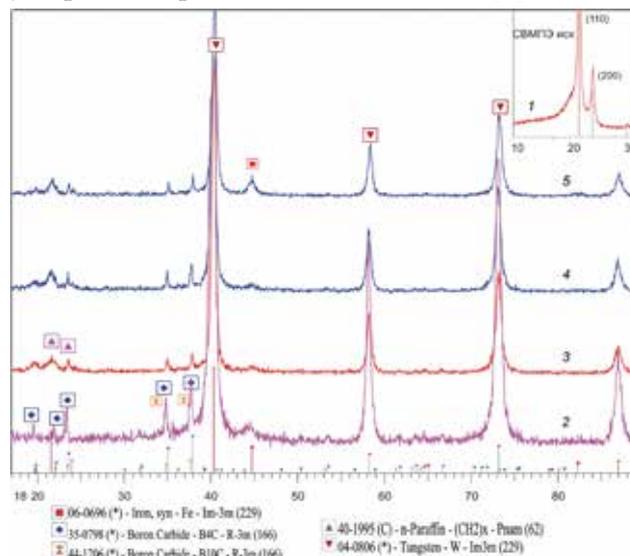


Рис. 4. Дифрактограммы исходных порошков СВМПЭ (1, на врезке) и B_4C/W (2) и композитов СВМПЭ/ B_4C/W , полученных механохимическим синтезом в течение 5 (3), 10 (4) и 25 (5) мин.

Таблица 2

Микроструктурные параметры фаз механокомпозиата СВМПЭ/ B_4C/W

	Исх. B_4C/W	5 мин.	10 мин.	25 мин.
B_4C				
a (Å)	5,604	5,608	5,608	5,609
c (Å)	12,104	12,099	12,079	12,078
L (нм)	46	67	87	60
ε_G	0,2949	0,6004	0,4002	0,2778
α -Fe				
a (Å)	2,866	2,879	2,874	2,873
L (нм)	8	57	26	17
ε_G	—	0,01	0,01	1,1032
W				
a (Å)	3,166	3,167	3,166	3,166
L (нм)	37	37	36	35
ε_G	0,4083	0,5607	0,447	0,4398

Формирование композиционных частиц состава СВМПЭ/ B_4C/W с преимущественными размерами 160–400 мкм происходит уже на начальном этапе МА. Увеличение длительности МА способствует некоторому возрастанию размера

композиционных частиц за счет процессов пластического деформирования. По данным сканирующей микроскопии измельчение частиц используемого модификатора B_4C/W при МА до 25 мин. не происходит (рис. 5 и 6). Частицы карбида бора сохраняют размер 1–5 мкм, частицы вольфрама и железа с размерами соответственно 0,1–0,2 и менее 0,08 мкм распределяются в матрице полимера.

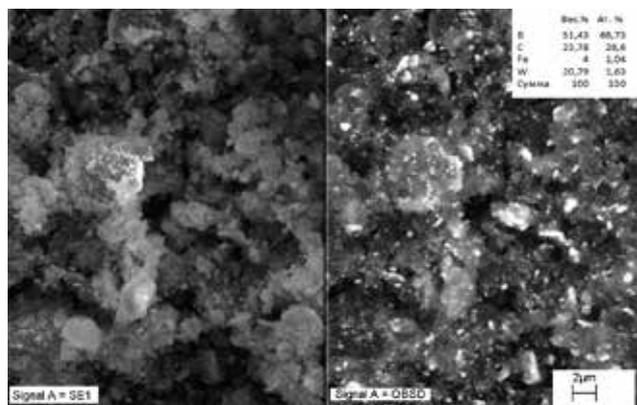


Рис. 5. СЭМ изображение композита B_4C/W (светлые участки на изображении BSD (backscattered diffraction) соответствуют частицам вольфрама и железа)

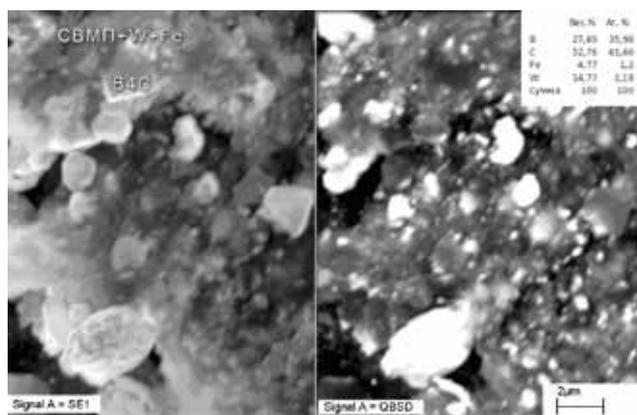


Рис. 6. СЭМ изображение композита СВМПЭ/ B_4C/W , сформированного при МА в течение 25 мин.

ИК-спектроскопические исследования химических связей в механокомпозитах B_4C/W и СВМПЭ/ B_4C/W , полученных с различной длительностью механической обработки, выявили, что характерные полосы карбида бора лежат в области волновых чисел 1200–700 cm^{-1} [11]. Основными частотами карбида бора в составе механокомпозита B_4C/W после активации являются: 1560 cm^{-1} (ν_{as} C–B–C), 1430 cm^{-1} , 1194 (плечо) cm^{-1} , 1058 cm^{-1} (ν_{as} C– B_3), 946 cm^{-1} (ν_s C– B_3), 866, 837 и 695 cm^{-1} (ν_1 B_{12}). Содержание углерода в карбиде влияет на положение полос поглощения связи B–C. Сдвиг пиков в низкочастотную область при МА обусловлен снижением количества углерода в карбиде бора и появлением фазы $B_{6,5}C$, обогащенной бором. Полоса ~ 1600 cm^{-1} приписывается

асимметричным валентным колебаниям ν_{as} C–B–C в структуре соединения $B_{4,3}C$, а появление полосы ~ 1450 cm^{-1} имеет место в более богатых бором композициях $B_{6,5}C$ в качестве новых мод, возникающих при растяжении и изгибе связей, которые содержат атом C в центральном узле B–C–B или C–C–C [8].

При совместной механической обработке композита B_4C/W с полимером полосы поглощения сдвигаются в высокочастотную область, что соответствует увеличению содержания углерода в карбиде до стехиометрии B_4C . Четкий пик поглощения с максимумом 1194 cm^{-1} относится к колебаниям связи B–C и обычно наблюдается в образцах поликристаллического карбида бора.

На всех спектрах регистрируются полосы поглощения, характерные для СВМПЭ, такие, как дублет 2913 и 2846 cm^{-1} , отвечающий за симметричные и асимметричные валентные колебания C–H, дублет 1468 и 1458 cm^{-1} , отвечающий за деформационные колебания C–H, и полосы кристалличности 730 и 719 cm^{-1} . Однако их интенсивность значительно снижается уже после 5 мин. обработки, а форма значительно уширена появлением низкочастотного плеча, что может быть обусловлено образованием дополнительных межмолекулярных водородных связей в результате деформирования (образование поперечных сшивок). Увеличение длительности обработки с 10 до 25 мин. приводит к исчезновению полос кристалличности полиэтилена 730 и 719 cm^{-1} , что может быть связано с нарушением конформационной регулярности макромолекул. Появление полос поглощения 883 и 1420 cm^{-1} после МА в течение 10 и 25 мин. обусловлено плоскими δ -колебаниями концевых метиленовых групп $RR'C = CH_2$ [12]. Рост их интенсивности может быть обусловлен разрывом молекулярных цепей и, следовательно, уменьшением молекулярной массы полимера. Появление и рост интенсивности полос в диапазоне 3000–3300 cm^{-1} указывают на формирование связей B–OH, поскольку механическая активация проводилась в воздушной атмосфере, влажность которой могла достигать 70 %. В области ИК-спектра 1600–1800 cm^{-1} нет дополнительных полос, которые свидетельствовали бы о формировании кислородосодержащих продуктов термического окисления полимеров.

Заключение

Таким образом, совместная обработка в планетарной мельнице полимера СВМПЭ и механокомпозита B_4C/W приводит к формированию полимерных композиционных частиц чешуйчатой формы с равномерным распределением в полимерной матрице частиц карбида бора и вольфрама с размерами 1–5 мкм и 0,1–0,2 мкм соответственно. Совместная МА приводит к из-

менению параметров тонкой структуры карбида бора B_4C . Основными возможными результатами взаимодействия полимерной матрицы и дисперсного модификатора при МА являются сшивка,

т.е. образование поперечно сшитых структур, и деструкция полимера с уменьшением его молекулярной массы.

Работа выполнена в рамках совместного проекта БРФФИ-РФФИ, при финансовой поддержке БРФФИ (Проект № T18P-187) и РФФИ (Проект № 18-53-00029).

Список литературы

- [1] Ястребинская А. В., Черкашина Н. И., Матюхин П. В. Радиационно-защитные нанонаполненные полимеры для космических систем // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12. С. 1191–1194.
- [2] Все о радиации и радиационной защите [Электронный ресурс]. URL: <http://rad-stop.ru/shhit-ot-radiatsii> (дата обращения: 14.09.2018).
- [3] Tcherdyntsev V. V., Kaloshkin S. D., Lunkova A. A., Musalitin A. M., Danilov V. D., Borisova Yu. V., Boykov A. A., Sudarchikov V. A. Structure, mechanical and tribological properties of radiation cross-linked ultrahigh molecular weight polyethylene and composite materials based on it // Journal of Alloys and Compounds, 2014, vol. 586, Suppl. 1, pp. S443-S445.
- [4] Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Попов С. Н., Слепцова С. А. Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена // Российский химический журнал. 2008. Т. LI. № 3. С. 147–152.
- [5] Калошкин С. Д., Горшенков М. В., Чердынцев В. В., Гульбин В. Н., Бойков А. А. Радиационно-защитный материал на полимерной основе с повышенными рентгенозащитными и нейтронозащитными свойствами. Пат. № 2561989, Российская Федерация, 2015, бюл. № 25.
- [6] Калошкин С. Д., Горшенков М. В., Чердынцев В. В., Гульбин В. Н., Бойков А. А. Способ получения радиационно-защитного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с повышенными радиационно-защитными свойствами. Пат. № 2563650, Российская Федерация, 2015, бюл. № 26.
- [7] Wannasri S., Panina S. V., Ivanova L. R., Kornienko L. A., Piriyaon S. Increasing wear resistance of UHMWPE by mechanical activation and chemical modification combined with addition of nanofibers // Procedia Engineering, 2009, vol. 1, pp. 67–70.
- [8] Domnich V., Reynaud S., Haber R. A., Chhowalla M. Boron Carbide: Structure, Properties, and Stability under Stress // Journal of the American Ceramic Society, 2011, vol. 94 (11), pp. 3605–3628.
- [9] Aselage T. L., Tissot R. G. Lattice Constants of Boron Carbide // Journal of the American Ceramic Society, 1992, vol. 75 (8), pp. 2207–2212.
- [10] Kuhlmann U., Werheit H., Schwetz K. A. Distribution of Carbon Atoms on the Boron Carbide Structure Elements // Journal of Alloys and Compounds, 1992, vol. 189, issue 2, pp. 249–258.
- [11] Лифшиц Е. В., Шевякова Э. П., Остапенко И. Т., Березняк Е. П., Саенко Л. А. ИК-спектроскопия карбидов бора различной стехиометрии // Вопросы атомной науки и техники. 2004. № 3. С. 19–22.
- [12] Дехант И., Данц Р., Киммер В., Шмольке Р. Инфракрасная спектроскопия полимеров / Пер. с нем., под ред. Э. Ф. Олейника. М.: Химия, 1976. 472 с.

POLYMER MATERIALS MODIFIED WITH BORON CARBIDE B_4C AND MECHANOCOMPOSITE B_4C/W FOR RADIATION PROTECTION IN SPACECRAFT

**P. A. Vityaz¹, S. A. Kovaleva¹, V. I. Zhornik¹, M. A. Belotserkovskii¹,
A. D. Dubinchuk², T. F. Grigoreva³, N. Z. Lyakhov³**

¹The Joint Institute of Mechanical Engineering NAS of Belarus, Minsk, Belarus

²Belarusian State University, Minsk, Belarus

³Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

Composites based on ultra-high molecular weight polyethylene, modified by nanoparticles of boron carbide B_4C and composite B_4C/W , for protection materials against fast and slow (thermal) neutrons and

γ-radiation, are formed by mechanochemical synthesis in a high-energy planetary ball mill. Their phase composition and microstructural characteristics were studied by X-ray phase analysis (D8 Advance diffractometer, Bruker), electron microscopy (scanning electron microscope CamScan 4) and infrared Fourier spectroscopy (Fourier spectrometer Nicolet iS10).

The joint mechanical treatment of ultra-high molecular weight polyethylene and boron carbide B₄C powders in the planetary ball mill leads to the formation of polymer composite particles of scaly shape with random distribution of boron carbide particles in them and nanocrystalline iron evenly distributed in the polymer matrix in an amount of ~ 9 wt. %. In addition, the structure of boron carbide with a lower carbon content (B_{6.5}C) is formed, and there is a break in the molecular chains of polyethylene and its amorphization. The combined processing of ultra-high molecular weight polyethylene and mechanocomposite B₄C/W in a planetary ball mill leads to the formation of polymer composite particles of flake shape with a uniform distribution of boron and tungsten carbide particles in the polymer matrix. Parameters of fine structure of boron carbide B₄C are changed. As a result of the interaction between the polymer matrix and the dispersed powders of the modifier, cross-linked structures are formed and the polymer is destroyed with a decrease in its molecular weight.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene, boron carbide B₄C, composite B₄C/W, X-ray analysis, electron microscopy, infrared Fourier spectroscopy.

References

- [1] Yastrebinskaya A. V., Cherkashina N. I., Matyukhin P. V. *Radiatsionno-zashchitnye nanonapolnennye polimery dlya kosmicheskikh system* [Radiation-protective nano-filled polymers for space systems] // International journal of applied and fundamental research, 2015, no. 12, pp. 1191–1194. (In Russian)
- [2] *Vsyo o radiatsii i radiatsionnoy zashchite* [All about radiation and radiation protection]. Available at: <http://rad-stop.ru/shhit-ot-radiatsii> (accessed 14.09.2018). (In Russian)
- [3] Tcherdyntsev V. V., Kaloshkin S. D., Lunkova A. A., Musalitin A. M., Danilov V. D., Borisova Yu. V., Boykov A. A., Sudarchikov V. A. Structure, mechanical and tribological properties of radiation cross-linked ultrahigh molecular weight polyethylene and composite materials based on it // Journal of Alloys and Compounds, 2014, vol. 586, Suppl. 1, pp. S443–S445.
- [4] Okhlopkova A. A., Petrova P. N., Popov S. N., Sleptsova S. A. *Polimernye kompozitsionnye materialy tribotekhnicheskogo naznacheniya na osnove politetraforetilena* [Polymer composite materials for tribotechnical purpose based on polytetrafluoroethylene] // Russian chemical journal, 2008, vol. LII, no. 3, pp. 147–152. (In Russian)
- [5] Kaloshkin S. D., Gorshenkov M. V., Cherdyntsev V. V., Gul'bin V. N., Boikov A. A. *Radiatsionno-zashchitnyy material na polimernoy osnove s povyshennymi rentgenozashchitnymi svoystvami* [Radiation-protective polymer-based material with increased x-ray and neutron protective properties]. Patent RU 2561989, 2015, bulletin no. 25.
- [6] Kaloshkin S. D., Gorshenkov M. V., Cherdyntsev V. V., Gul'bin V. N., Boikov A. A. *Sposob polucheniya radiatsionno-zashchitnogo materiala na osnove sverkhvysokomolekulyarnogo polietilena s povyshennymi radiatsionno-zashchitnymi svoystvami* [Method for obtaining radiation-protective material based on ultra-high molecular weight polyethylene with increased radiation-protective properties]. Patent RU 2563650, 2015, bulletin no. 26.
- [7] Wannasri S., Panina S. V., Ivanova L. R., Kornienko L. A., Piriyaon S. Increasing wear resistance of UHMWPE by mechanical activation and chemical modification combined with addition of nanofibers // Procedia Engineering, 2009, vol. 1, pp. 67–70.
- [8] Domnich V., Reynaud S., Haber R. A., Chhowalla M. Boron Carbide: Structure, Properties, and Stability under Stress // Journal of the American Ceramic Society, 2011, vol. 94 (11), pp. 3605–3628.
- [9] Aselage T. L., Tissot R. G. Lattice Constants of Boron Carbide // Journal of the American Ceramic Society, 1992, vol. 75 (8), pp. 2207–2212.
- [10] Kuhlmann U., Werheit H., Schwetz K. A. Distribution of Carbon Atoms on the Boron Carbide Structure Elements // Journal of Alloys and Compounds, 1992, vol. 189, issue 2, pp. 249–258.
- [11] Lifshits E. V., Shevyakova E. P., Ostapenko I. T., Berezyak E. P., Saenko L. A. *IK-spektroskopiya karbidov bora razlichnoy stekhiometrii* [IR spectroscopy of boron carbides of different stoichiometry] // Problems of atomic science and technology, 2004, no. 3, pp. 19–22. (In Russian)
- [12] Dechant J., Danz R., Kimmer W., Schmolke R. *Infrakrasnaya spektroskopiya polimerov* [Infrared spectroscopy of polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1976, 472 p. (In Russian)

АЛЬТЕРНАТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ РАКЕТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ кГц-РАЗРЯДА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Г. Н. Чурилов^{1, 2} ✉, К. А. Финников², Н. С. Николаев^{1, 2}

¹Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН,
г. Красноярск, Российская Федерация

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

Знания, полученные в результате детального исследования физики газового разряда, легли в основу разработки и изготовления ракетных плазменных двигателей. Дальнейший прогресс в этом направлении разработчики связывают с увеличением плотности рабочего тела – плазмы. Однако увеличение плотности газа, в котором осуществляется разряд, влечет возникновение ионизационной и перегретой неустойчивостей, которые в конечном результате приводят к контракции разряда. Это является основным препятствием на пути получения устойчивых плазменных потоков при высоком давлении и разработки на их основе плазменных двигателей. В этой работе, на примере изготовленных лабораторных вариантов плазменных генераторов, решаются конкретные народно-хозяйственные задачи, показана возможность обойти эту проблему путем применения дугового разряда переменного тока высокой частоты. Приводятся экспериментальные результаты по их применению для устройств, работающих при атмосферном давлении с использованием в качестве плазмообразующего газа аргона, гелия и воздуха. Представлены результаты исследования конструкции плазматрона, в котором совмещены магнитная и вихревая стабилизации. Эта конструкция рассматривается в качестве прототипа ракетного плазменного двигателя, работающего, например, на воздушно-метановой и кислородно-метановой смесях.

Ключевые слова: ракетные плазменные двигатели, плазма, переменный ток, килогерцовый диапазон, неустойчивости плазмы, дуговые разряды атмосферного давления.

Введение

Многие проблемы физики газовых разрядов в настоящее время уже преодолены и технические решения, полученные на их основе, воплощены в космических аппаратах [1] и др. Как в России, так и за рубежом имеется большой опыт теоретических и практических исследований плазменных потоков. Для генерации плазмы обычно применяют плазматроны, в которых в качестве источника питания используется постоянный или переменный ток, в СВЧ или радиочастотном диапазонах. Все они имеют свои достоинства и недостатки. Поведение плазмы и ее свойства необходимо рассматривать совместно с источником питания, схемой согласования и характеристиками элементов, которые входят в состав этой схемы. Так как име-

ется зависимость характерных времен различных переходных процессов, установления различного вида неустойчивостей в плазме, то, наряду со свойствами среды и динамики газовых потоков, определяющими параметрами являются частота питающего разряд электрического поля и воздействующее на плазму магнитное поле. Обычно выделяют два предельных случая: когда период изменения питающего поля много меньше времени установления распределения электронов по энергиям, и когда такой период – много больше. В основном исследователи занимаются рассмотрением двух этих предельных случаев. Плазма, получающаяся на постоянном токе, обычно имеет высокую плотность и склонна к контракции разряда. В этом случае требуется разработка сложных систем стабилизации для борьбы с большой эрозией электродов [2]. Плазма переменного тока МГц-диапазона является высокостабильной, однако в ней имеется существенная разница в под-

✉ churilov@iph.krasn.ru

вижности ионов и электронов. В этом диапазоне частот при согласовании разрядов с источником питания необходимо учитывать реактивную компоненту как самих разрядов, так и подводящих цепей. Емкостные и индукционные разряды требуют существенного понижения давления рабочего тела [3], что в некоторых случаях является недостатком.

Неустойчивости в плазме дугового разряда

Дальнейшее развитие ракетных плазменных двигателей (РПД) связано с увеличением удельной тяги, которая напрямую зависит от плотности используемых плазменных потоков. Одной из проблем, мешающих достигнуть желаемых плотностей, являются ионизационная и перегревная неустойчивости. Эти неустойчивости приводят к установлению сильно неоднородного распределения степени ионизации и электропроводности. Ток стягивается в узкий шнур, что препятствует осуществлению управления плазменным течением с помощью пондеромоторной силы, поскольку токовый шнур не может эффективно обмениваться импульсом с основной частью потока, плотность тока в которой гораздо слабее. Природа ионизационных и тепловых неустойчивостей разрядов исследовалась достаточно подробно. Итоги исследований вошли в учебники и книги, описывающие физику газового разряда [4; 5]. Известно, что в разных условиях возможно развитие неустойчивостей по двум основным механизмам.

Ионизационная неустойчивость возникает в результате роста скорости рождения свободных электронов, что приводит к росту концентрации электронов. Подобная ситуация возникает в неравновесной плазме как следствие того, что функция распределения электронов в области энергий порядка 10 эВ, как и концентрации возбужденных частиц, сильно ниже своих равновесных значений. С ростом концентрации электронов этот разрыв быстро уменьшается в результате возрастания влияния столкновений электрон-электрон и электронно-столкновительных переходов нейтральных частиц. По этой причине возможна зависимость скорости ионизационных процессов

$$\left(\frac{dn_e}{dt}\right)_{\text{иониз.}} \approx \text{const} \cdot n_e^k, \quad k > 2,$$

и, в условиях преобладания двухчастичных комбинационных процессов с

$$\left(\frac{dn_e}{dt}\right)_{\text{рекомб}} = \text{const} \cdot n_e^2$$

баланс частиц электронной компоненты становится неустойчивым.

Перегревная неустойчивость возникает как следствие растущей зависимости энерговыделения в плазме от удельной внутренней энергии. Развитие перегревной неустойчивости возможно как в равновесной, так и в неравновесной плазме. Время развития ионизационной неустойчивости может быть очень малым в сравнении с временами развития перегревной, поскольку первое определяется динамикой электронного газа, тогда как второе – динамикой выравнивания неоднородности давления среды. В то же время, процесс развития ионизационной и перегревной неустойчивостей в полях диапазона десятков и сотен кГц практически не изучен. Во многом это является следствием того уже отмеченного обстоятельства, что разряды в данном диапазоне частот не рассматривались как интересные в плане практических приложений. Известно, что в высокочастотном поле, в том числе и в электродных разрядах, возможно поддерживать диффузный тлеющий разряд при давлениях вплоть до атмосферного [6; 7]. Одной из причин такого поведения разряда может быть эффект запирания ионов – полупериод поля много меньше времени пролета иона через разрядный промежуток. Другой важный фактор нестационарности поля – чередование периодов высокой и низкой величины поля. Поскольку скорость ионизации имеет резкую зависимость от напряженности электрического поля, ионизационный процесс протекает за короткие периоды, в течение которых напряженность поля ниже максимальной не более чем на 10–20%. Протяженность этих периодов составляет величину ~ 1 мкс. Ионизационные процессы при этом приобретают сходство с процессами, происходящими в случае развития разряда в импульсном электрическом поле, которое устойчиво и приводит к формированию диффузной структуры разряда [8]. В условиях сильного поля многие механизмы, необходимые для развития ионизационной неустойчивости, оказываются подавленными. В частности, основным механизмом ионизации может стать не ступенчатая ионизация, а ионизация из основного состояния. Похожий эффект может проявляться, хотя и не столь существенно, в гармонически изменяющемся поле. Существенным также является влияние частоты поля на форму функции распределения электронов по энергии. Известно, что в высокочастотном поле при определенных условиях формируется бимаксвелловское распределение электронов по энергии [9], причем эффективная температура электронов в области высоких энергий (в районе 10 эВ и выше) выше, чем в области низких. В такой ситуации подавлена ионизационная неустойчивость, поскольку высокая концентрация электронов соответствует равновесной функции распределения. Вследствие этого снижается доля электронов, имеющих энергию, до-

статочную для ионизации или возбуждения нейтральной частицы. Данный эффект наблюдается для сравнительно высоких частот (десятки мегагерц) и при низких давлениях (1 мбар и ниже). В этих условиях частота поля сопоставима с частотой потери импульса электрона. В условиях более высоких давлений и более низких частот (100 кГц при давлениях выше 1 мбар) частота поля может быть сопоставима с другой характерной частотой, соответствующей динамике электронной компоненты – с частотой потери энергии электрона. В этих случаях функция распределения будет нестационарна. В соответствии со сказанным выше, предотвратить развитие неустойчивости можно путем использования переменного электрического поля для возбуждения разряда и поддержания ионизованного состояния. Применяя магнитное поле, изменяющееся синфазно с током разряда, можно обеспечить постоянство направления поперечной силы и задержку перехода разряда в сильно контрагированное состояние. При определенных частотах электрического поля, геометрии плазменного потока и условиях его взаимодействия с внешним синфазным магнитным полем неоднородность ионизации может не успевать переводить разряд в фазу высокой контракции, при которой разрушаются электроды и теряют устойчивость плазменные потоки.

Дуговой разряд переменного тока кГц-диапазона

Задолго до того как в мире появились сверхточные полупроводниковые элементы, а также мощные магнитопроводы, конденсаторы с высокой емкостью и малыми потерями, работающие в диапазоне до 10^3 кГц, работы по исследованию генерации плазмы в этом диапазоне проводились как в Советском Союзе, так и за рубежом. В основном использовались ламповые генераторы. Однако в СССР транзисторные усилители, позволяющие применять мощности, составляющие десятки и сотни кВт в указанном выше диапазоне, появились намного раньше. С появлением транзисторных усилителей возможность использования высокочастотного (ВЧ) диапазона существенно возросла. Действительно, уменьшились габариты установок, увеличился их КПД. Для ламповых генераторов КПД составляет 40 %, а для генераторов на транзисторах – более 90 %.

С первых шагов работы в области получения плазмы в кГц-диапазоне мы столкнулись с рядом трудностей, связанных с вопросами согласования источников питания и разрядов. Необходимо было подводить энергию по линиям с низкой индуктивностью или компенсируя индуктивную компоненту емкостной. Первые же результаты наших исследований показали, что

как процессы генерации плазмы, так и сама плазма в кГц-диапазоне существенно отличаются от постоянного тока и МГц-диапазона.

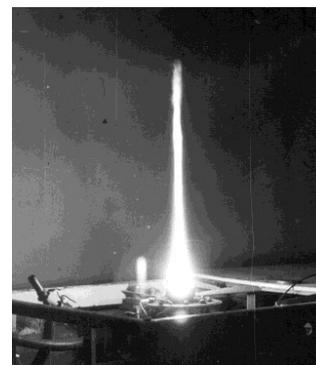


Рис. 1. Фотография струи углеродной плазмы

На рис. 1 приведена фотография струи плазмы, образующейся в результате разряда между графитовым стержнем и графитовой втулкой, имеющей сечение – усеченный конус с осевым отверстием, в открытом пространстве, без введения какого-либо газа. Длина струи – 0,75 м, ток дуги – 500 А. Температура плазменной струи вдоль оси изменялась от 5500 К до 2000 К на расстоянии 0,01 м и 0,75 м соответственно [10]. Диаметр сопла такого генератора углеродной плазмы составляет 10^{-2} м. Для плазменных генераторов на постоянном токе длина струи достигает всего нескольких калибров выходного отверстия, т.е. для нашего случая она могла бы быть всего $(3-4) \cdot 10^{-2}$ м. На основе такого разряда была разработана установка для синтеза фуллеренов при атмосферном давлении гелия в камере. Следует заметить, что это позволило нам исключить из технологии процесс поддержания низкого давления в течение синтеза. Наша установка отличается высокой производительностью и низкой себестоимостью получаемых фуллеренов и других нанодисперсных углеродных продуктов. Сейчас внимание исследователей привлекают эндодральные металлофуллерены (ЭМФ), молекулы которых содержат внутри своего замкнутого каркаса из атомов углерода атом металла, чаще всего редкоземельного элемента. С фундаментальной точки зрения такая молекула интересна, так как она имеет структуру, похожую на атом. Внутри отрицательно заряженной оболочки находится положительно заряженный ион металла, поэтому ее часто называют «сверхатомом». С прикладной точки зрения ЭМФ также интересны из-за большого количества возможностей их применения в медицине, электронике и т.д. Основная проблема проведения широкомасштабных исследований ЭМФ как прикладных, так и фундаментальных – это низкая производительность методов синтеза. Применение плазмы кГц-диапазона позволило нам разработать установки, произво-

длительность которых существенно превышает мировой уровень [11–13].



Рис. 2. Фотография ВЧ дугового разряда между холодными медными электродами, при пониженном давлении

Исследования разрядов с холодными металлическими электродами в кГц-диапазоне показали, что даже для больших токов их эрозия на 2–3 порядка меньше, чем для разрядов постоянного тока. Разряды имеют диффузный характер, при этом плазма по параметрам соответствует плазме дугового разряда постоянного тока. На рис. 2 мы можем видеть разряд между кольцевым электродом из медной трубки, выполняющим еще и функцию индуктора, по которому протекает ток и вода, и металлическим стержнем, также охлаждаемым водой. Ток разряда и ток, протекающий по металлическому кольцу, совпадают по частоте и фазе. Если плоскость кольцевого электрода пересекает ось стержня, то плазма равномерно его заполняет и мы можем видеть плазменное кольцо. Скоростная съемка показала, что плазменное кольцо на самом деле это вращающийся плазменный «сгусток», который образуется в результате взаимодействия радиальной компоненты тока разряда и осевой компоненты магнитного поля кольцевого электрода. Малая эрозия разрядов в кГц-диапазоне позволила использовать эти разряды для разработки устройств эмиссионной спектроскопии и очистки цветного проката, которые защищены соответствующими патентами [14; 15].

Экспериментальная реализация концепций создания плазменных двигателей питаемых током кГц-диапазона

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 в область приоритетных направлений попали исследования РПД двигателей (необходимость эффективного освоения космического и воздушного пространства). Мы обобщили накопленный

опыт генерации плазмы в области электрических и магнитных полей кГц-диапазона и изготовили лабораторный вариант плазменного генератора. Этот плазменный генератор может быть прототипом двигателя, начальное давление рабочего тела которого имеет атмосферное или более высокое давление. В основу разработки нами были положены следующие концепции:

1. Применение токов кГц-диапазона позволяет избежать развития наиболее опасных неустойчивостей – ионизационной и перегревной при атмосферном и более высоких давлениях.
2. Плазма имеет параметры, соответствующие дуговому разряду при диффузном характере.
3. Эрозия металлических электродов на 2–3 порядка ниже эрозии электродов, используемых в разрядах на постоянном токе.
4. Применение магнитного поля, синфазного с током разряда, позволяет управлять плазменными потоками.

На основе ВЧ разряда между металлическими электродами в потоке аргона с рабочей частотой тока 40–400 кГц нами разработана конструкция дугового плазменного генератора. В плазменном генераторе использована стабилизация, основанная на применении тока разряда и тока катушки, обеспечивающей осевое магнитное поле, сдвиг фазы между которыми равен нулю, а также применении вихревого потока термоизолирующего газа.

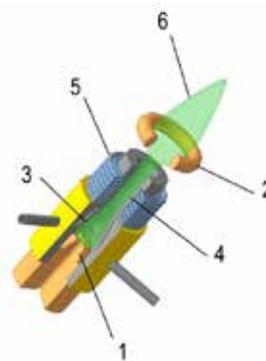


Рис. 3. Схема генератора плазменного потока

На рис. 3 представлено схематическое изображение этого устройства, где 1 – торцевой электрод с отверстием для подачи плазмообразующего газа, 2 – кольцевой электрод, 3 – предварительная камера закрутки термоизолирующего газа, 4 – разрядная камера, 5 – соленоид для создания стабилизирующего магнитного поля, 6 – плазменный поток.

Разряд осуществляется между электродом 1, выполненным из охлаждаемого водой стержня, и электродом 2, выполненным в виде металлического охлаждаемого водой кольца. Плазмообразующий газ подается через осевое отверстие электрода 1. Термоизолирующий газ через тангенциально рас-

положенные к оси генератора штуцера подается в предварительную камеру 3 и приобретает вращательное движение относительно оси. Поток вращающегося газа поступает в разрядную камеру 4. Ток, протекающий по катушке 5, синфазный с током разряда, образует магнитное поле, которое в соответствии с законом Ампера и силой Лоренца осуществляет стабилизацию разряда. По электроду 2 протекает ток, синфазный с током в катушке 5 и совпадающий с ним по частоте. Разрядная и предварительная камеры выполнены из керамики. Electroды выполнены из меди. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон, а в качестве термоизолирующего – воздух, который подавался компрессором. Фотография плазменного потока и его спектрально полученные характеристики (температура и электронная концентрация) приведены на рис. 4 (а и б соответственно). При диаметре выходного сопла 8 мм, диаметр плазменного потока в разрядном промежутке составляет 4,2 мм. Сжатие потока осуществляется за счет действия системы стабилизации, описанной выше. В соответствии с геометрическими размерами электрода-индуктора плазменный поток расширяется до диаметра 23 мм. При этом высота выброса плазмы, измеряемая от внешней поверхности кольцевого электрода-индуктора, составляет 120 мм (рис. 4а).

Экспериментальным путем было установлено, что эта высота зависит от внутреннего радиуса кольцевого электрода сильнее, чем от расходов плазмообразующего и термоизолирующего газов. Спектры были получены на спектрографе PGS-2 с цифровой системой регистрации ФЭК-9. Температура разряда измерялась методом относительных интенсивностей, с использованием спектральных линий меди (510,5 и 521,8 нм). Измеренные хордовые значения интенсивностей были пересчитаны с помощью преобразования Абеля, было получено истинное радиальное распределение интенсивностей в зависимости от радиуса разряда (рис. 4а).

Вольтамперные характеристики применяемого в плазменном генераторе разряда представлены на рис. 5.

При переходе через нуль наблюдается резкое возрастание напряжения. Оно достигает максимального значения 380 В при токе 0,5 А. Затем напряжение падает до 26 В при токе 1 А. Далее наблюдается рост напряжения и тока до максимального напряжения 178 В при токе 12,6 А. При амплитудном значении тока 13,0 А, напряжение достигает значения 162 В. Далее наблюдается падение напряжения и тока до нуля. В отрицательном полупериоде данный процесс повторяется, однако наблюдается асимметрия полупериодов. Исходя из геометрических размеров плазменного потока, можно выделить четыре области за полупериод с различной электропроводностью плазмы. На от-

резке ОА удельная электрическая проводимость составляет 11,6 См/м. На отрезке АВ – 12,4 См/м, ВС – 656,8 См/м, СО – 682,2 См/м. Действующее значение мощности разряда – 1,4 кВт.

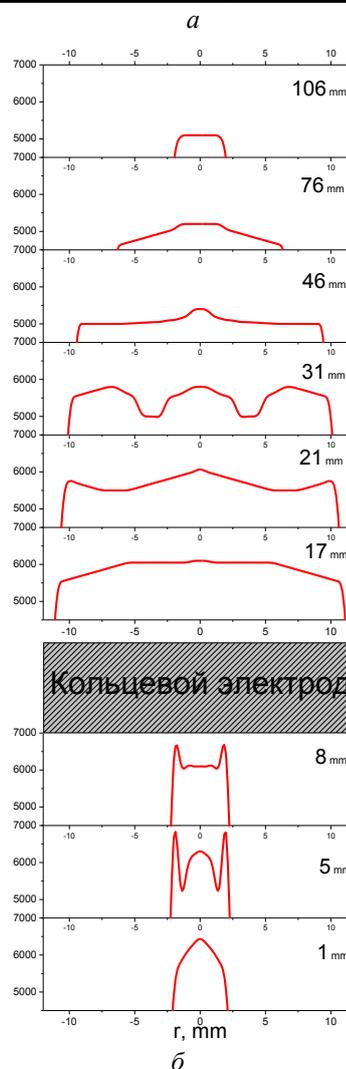
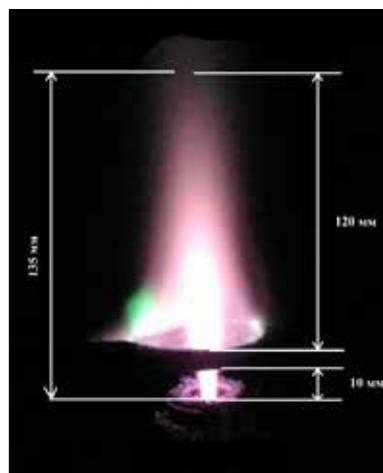


Рис. 4. а – фотография разряда с характерными размерами; б – распределение температуры разряда вдоль разрядного промежутка и на выходе из плазматрона, на различных сечениях по высоте. Погрешность измерений – 1,3 %

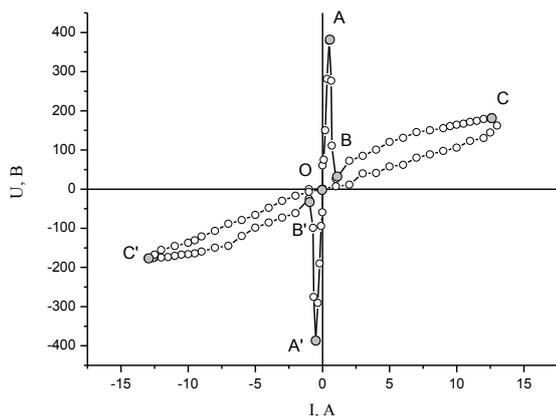


Рис. 5. Вольтамперная характеристика плазматрона, питаемого током кГц-диапазона. Погрешность измерений – 0,2 %

Кольцевой электрод-индуктор в своей плоскости вблизи оси создает синусоидально изменяющееся магнитное поле с амплитудой $0,070 \pm 0,002$ Тл, а стабилизирующая катушка с амплитудой $(2,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$ Тл.

Экспериментальным путем было установлено, что величина эрозии электродов составляет $1,2 \cdot 10^{-8}$ кг/Кл. Исходя из этого, по формуле Саха можно рассчитать электронную концентрацию в плазме кГц-диапазона. При расходе плазмообразующего газа 10^{-4} кг/с молярная доля ионов материала электрода будет в районе 10^{-3} . В таком случае при температуре 5000 К концентрация электронов составляет $2 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$, при 6000 К – $1 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, при 7000 К – $3 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$. Полученные оценки хорошо согласуются с экспериментальными измерениями электронной концентрации с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии.

Нами была измерена сила, с которой поток газа давит на пластинку из молибдена без разряда и с разрядом на расстоянии 10^{-2} м от внешней плоскости кольцевого электрода. Измерения были проведены при атмосферном давлении окружающей разряд среды. Массовый расход плазмообразующего газа аргона и термоизолирующего газа воздуха: $(1,07 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$ кг/с и $(1,60 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$ кг/с соответственно. Сила газовой струи при этом – $(1,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$ Н, удельная тяга – $0,70 \pm 0,06$ м/с. Сила плазменного потока составила $0,024 \pm 0,003$ Н, удельная тяга – $92,3 \pm 0,1$ м/с.

Заключение

В работе показана возможность применения токов кГц-диапазона для разработки РПД, работающих при атмосферном давлении рабочей среды. В дальнейшем мы планируем провести исследования эффективности работы генераторов на метане и ацетилене при использовании воздуха и кислорода в качестве окислителей. Для этого будет проведена модернизация установки и изготовлен стенд, позволяющий проводить такого вида работы. Будут проведены работы по оценке возможности применения данного направления для РПД, работающих на органическом топливе при использовании кислорода и азотно-кислородной смеси, которые можно будет использовать для перемещения в воздухе. Также будет проведена модернизация установки с целью исследования возможности применения разрядов и магнитных полей кГц-диапазона для работы в открытом космосе и управления космическими аппаратами.

Список литературы

- [1] Ким В. П. Конструктивные признаки и особенности рабочих процессов в современных стационарных плазменных двигателях Морозова // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. Вып. 3. С. 45–59.
- [2] Попов В. Ф., Горин Ю. Н. Процессы и установки электронно-ионной технологии. М.: Высш. шк., 1988. 255 с.
- [3] Монтасер А., Голайтли Д. Индуктивно-связанная плазма в аналитической атомной спектроскопии. Нью-Йорк: VCH Publishers, 1992.
- [4] Capitelli M., Bardsley J. N. Nonequilibrium Processes in Partially Ionized Gases. Springer Science & Business Media, 2012, 695 p.
- [5] Smirnov B. M. Theory of Gas Discharge Plasma. Springer, 2014. 423 p.
- [6] Bruggeman P., Cunge G., Sadeghi N. Absolute OH density measurements by broadband UV absorption in diffuse atmospheric-pressure He–H $_2$ O RF glow discharges // Plasma Sources Science and Technology, 2012, vol. 21, no. 3, p. 035019.
- [7] Schutze A., Jeong J. Y., Babayan S. E., Jaeyoung P., Selwyn G. S., Hicks R. F. The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources // IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, vol. 26, no. 6, pp. 1685–1694.
- [8] Apollonov V. V. High-Energy Molecular Lasers: Self-Controlled Volume-Discharge Lasers and Applications. Springer, 2016, 440 p.
- [9] Sharma S., Sirse N., Kaw P. K., Turner M. M., Ellingboe A. R. Effect of driving frequency on the electron-sheath interaction and electron energy distribution function in a low pressure capacitively coupled plasmas // Physics of Plasmas, vol. 23, issue 11. doi: 10.1063/1.4967356

- [10] Чурилов Г. Н. Плазменный синтез фуллеренов // Приборы и техника эксперимента. 2000. № 1. С. 5–15.
- [11] Чурилов Г. Н. Способ синтеза фуллереновой смеси в плазме при атмосферном давлении. Пат. № 2320536 Российская Федерация, 2008. Бюл. № 9.
- [12] Чурилов Г. Н., Осипова И. В., Внукова Н. Г. Способ синтеза фуллереновой смеси в плазме при атмосферном давлении. Пат. № 2483020 Российская Федерация, 2013. Бюл. № 15.
- [13] Чурилов Г. Н., Внукова Н. Г. Способ синтеза эндодральных фуллеренов. Пат. № 2582697 Российская Федерация, 2016. Бюл. № 12.
- [14] Чурилов Г. Н. Источник света для спектрального анализа. Пат. № 2326353 Российская Федерация, 2008, Бюл. № 16.
- [15] Игнатьев Г. Ф., Чурилов Г. Н. Способ очистки проката. Пат. № 1715452 Российская Федерация, 1997.

ALTERNATIVE DIRECTION OF DEVELOPMENT OF ROCKET PLASMA ENGINES BASED ON kHz DISCHARGE IN AN ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD

G. N. Churilov^{1, 2}, K. A. Finnikov², N. S. Nikolaev^{1, 2}

¹Kirensky Institute of Physics SB RAS, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

The knowledge gained from a detailed study of the physics of gas discharge formed the basis for the development and manufacture of rocket plasma thrusters. The developers associated further progress in this direction, with an increase in the density of the reaction mass – plasma. However, an increase in the density of the gas in which the discharge takes place leads to the occurrence of ionization and overheating instabilities, which ultimately lead to contraction of discharge. This is the main obstacle to obtaining stable plasma flows at high pressure and the development of plasma engines on their basis. In this work, using the example of laboratory-produced plasma generator generators that solve specific national economic problems, we have shown the possibility of circumventing this problem by applying high-frequency arc discharge of alternating current. Experimental results are given for devices working at atmospheric pressure using as plasma-forming gas like argon, helium and air. There are presented results of investigation of plasmatron construction with combined magnetic and vortex stabilization. This design can be taken as a prototype of a rocket plasma engine using, for example, as propellant like air-methane and oxygen-methane mixtures.

Keywords: rocket plasma engines, plasma, alternating current, kilohertz range, plasma instabilities, arc discharges of atmospheric pressure.

References

- [1] Kim V. P. *Konstruktivnye priznaki i osobennosti rabochih processov v sovremennyh stacionarnykh plazmennyyh dvigatelyah Morozova* [Design features and operating procedures in advanced Morozov's stationary plasma thrusters] // Journal of Technical Physics, vol. 85, issue 3, pp. 45–59. (In Russian)
- [2] Popov V. F., Gorin Yu. N. *Processy i ustanovki ehlektronno-ionnoy tekhnologii* [Processes and installations of electron-ion technology]. Moscow, Higher. shk., 1988, 255 p. (In Russian)
- [3] Montaser A., Golightly D. W. *Induktivno-svyazannaya plazma v analiticheskoy atomnoy spektrometrii* [Inductively Coupled Plasmas in Analytical Atomic Spectrometry]. New York, VCH Publishers Inc., 1992. (In Russian)
- [4] Capitelli M., Bardsley J. N. *Nonequilibrium Processes in Partially Ionized Gases*. Springer Science & Business Media, 2012, 695 p.
- [5] Smirnov B. M. *Theory of Gas Discharge Plasma*. Springer, 2014, 423 p.
- [6] Bruggeman P., Cunge G., Sadeghi N. Absolute OH density measurements by broadband UV absorption in diffuse atmospheric-pressure He–H₂O RF glow discharges // Plasma Sources Science and Technology, 2012, vol. 21, no. 3, p. 035019.
- [7] Schutze A., Jeong J. Y., Babayan S. E., Jaeyoung P., Selwyn G. S., Hicks R. F. The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources // IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, vol. 26, no. 6, pp. 1685–1694.
- [8] Apollonov V. V. *High-Energy Molecular Lasers: Self-Controlled Volume-Discharge Lasers and Applications*. Springer, 2016, 440 p.
- [9] Sharma S., Sirse N., Kaw P. K., Turner M. M., Ellingboe A. R. Effect of driving frequency on the electron-sheath interaction and electron energy distribution function in a low pressure capacitively coupled plasmas // Physics of Plasmas, vol. 23, issue 11. doi: 10.1063/1.4967356.

- [10] Churilov G. N. *Plazmennyy sintez fullerenov* [Plasma synthesis of fullerenes] // Instruments and Experimental Technique, 2000, no. 1, pp. 5–15. (In Russian)
- [11] Churilov G. N. *Sposob sinteza fullerеновой smesi v plazme pri atmosfěrnоm davlenii* [Method for the synthesis of fullerene mixture in plasma at atmospheric pressure]. Patent RU 2320536, 2008, bulletin no. 9.
- [12] Churilov G. N., Osipova I. V., Vnukova N. G. *Sposob sinteza fullerеновой smesi v plazme pri atmosfěrnоm davlenii* [Method for the synthesis of fullerene mixture in plasma at atmospheric pressure]. Patent RU 2483020, 2013, bulletin no. 15.
- [13] Churilov G. N., Vnukova N. G. *Sposob sinteza ehndоehdral'nyh fullerenov* [Method for the synthesis of endohedral fullerenes]. Patent RU 2582697, 2016, bulletin no. 12.
- [14] Churilov G. N. *Istоchnik sveta dlya spektral'nogo analiza* [Light source for spectral analysis]. Patent RU 2326353, 2008, bulletin no. 16.
- [15] Ignatiev G. F., Churilov G. N. *Sposob ochistki prokata* [Method of cleaning rolled]. Patent RU 1715452, 1997, bulletin no. 16.

ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР Fe/Si В ПРОЦЕССЕ РОСТА

И. А. Тарасов¹ ✉, И. А. Яковлев¹, С. Н. Варнаков¹,
С. М. Жарков^{1,2}, С. Г. Овчинников^{1,2}

¹Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН,
г. Красноярск, Российская Федерация

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

С использованием метода одноволновой лазерной эллипсометрии *in situ* проведено исследование процесса формирования многослойной структуры $[\text{Si}/\text{Fe}^{57}/\text{Fe}^{56}]_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$. Были получены сведения об оптических и структурных свойствах данной структуры. Изменение морфологии поверхности растущих слоев и их оптических характеристик оказываются неидентичными для случаев осаждения железа на поверхность слоя кремния и осаждения кремния на поверхность слоя железа. Полученные профили оптических постоянных свидетельствуют об увеличении толщины переходных слоев, содержащих твердые растворы «железо–кремний» и силициды. Характер изменения оптических постоянных усложняется с каждым последующим слоем железа, осаждаемым на поверхность кремния. Поведение профилей n и k , соответствующих формированию кремниевых слоев, имеет более простой характер по сравнению с поведением подобных профилей железа. Эти профили имеют лишь некоторые особенности на начальных этапах роста и соответствуют формированию аморфных слоев кремния. Полученные данные согласуются с данными просвечивающей электронной микроскопии.

Ключевые слова: эллипсометрия, силициды железа, многослойные Fe/Si наноструктуры.

Введение

В последние годы наблюдается повышенный интерес к исследованиям тонких пленок соединений железа и кремния на полупроводниковых подложках, что обусловлено новыми физическими свойствами этих структур и перспективой их использования в устройствах электроники [1; 2], которые могут найти также применение в космической технике. В частности, полупроводниковый силицид железа $\beta\text{-FeSi}_2$ благодаря наличию в своей структуре областей с низкой электронной плотностью является более устойчивым к ионизирующему излучению в открытом космосе по сравнению с другими полупроводниками [3].

Толщины формируемых пленок в таких структурах могут варьироваться от долей до десятков нанометров. Обычно технологические параметры роста выбираются посредством предварительных калибровок, которые могут значительно изменяться в процессе роста. В связи с

этим существует необходимость контроля толщины отдельных слоев структуры в процессе их формирования. Поэтому важным является вопрос контроля параметров растущих наноструктур в процессе их формирования. Эффективным для таких целей является метод эллипсометрии.

Полученные результаты и их обсуждение

В данной работе для изучения морфологии и состава на интерфейсах Fe/Si и Si/Fe в многослойных структурах железо/кремний была получена структура $[\text{Si}/\text{Fe}^{57}/\text{Fe}^{56}]_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$. Напыление многослойной структуры системы $(\text{Fe}/\text{Si})_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ производилось методом термического испарения в сверхвысоком вакууме. Подробное описание метода можно найти в работе [4].

На рис. 1 представлен общий вид экспериментальной эллипсометрической номограммы, характеризующей синтез многослойной структуры $(\text{Fe}/\text{Si})_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$. Эллипсометрические измерения проводились с помощью лазерного эллипсометра ЛЭФ-751М [5]. После выгрузки

✉ tia@iph.krasn.ru

© Тарасов И. А., Яковлев И. А., Варнаков С. Н.,
Жарков С. М., Овчинников С. Г., 2018

полученного образца проводились исследования методом просвечивающей электронной микроскопии. На рис. 2 представлено электронно-микроскопическое изображение поперечного среза многослойной структуры $(\text{Fe/Si})_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$.

указателями отмечены начало и конец синтеза каждого слоя. Анализ полученных экспериментальных данных проводился путем решения обратной задачи эллипсометрии в программе SingleW [6].

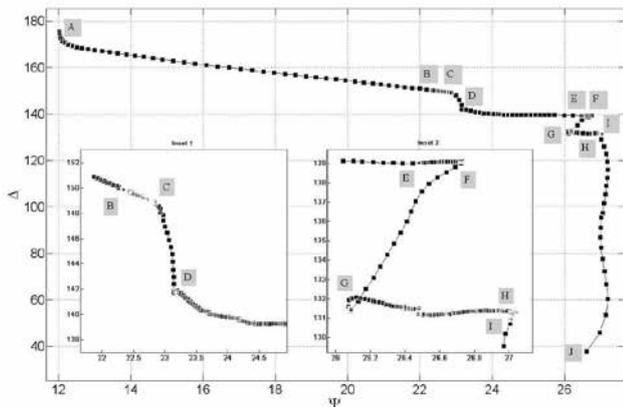


Рис. 1. Общий вид экспериментальной эллипсометрической номограммы, характеризующей синтез многослойных структур. Вставка 1 представляет собой увеличенный вид участка BCD общей эллипсометрической номограммы, вставка 2 – EFGHI части

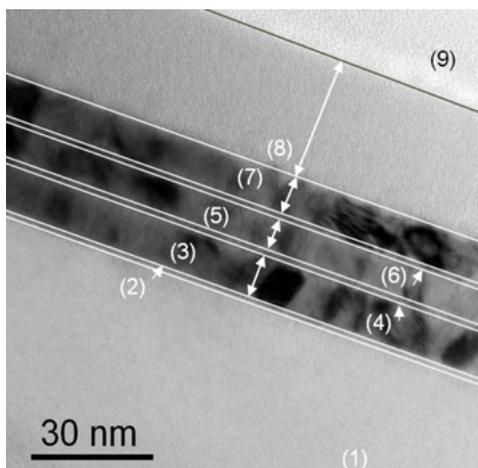


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение поперечного среза многослойной структуры $(\text{Fe/Si})_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$

Анализ поперечного среза образца дает следующие результаты толщины слоев синтезированной структуры (табл. 1).

Таким образом, общая толщина многослойной $(\text{Fe/Si})_3$ пленки (слоев 2–7) равна 31,1 нм. Толщина слоев Fe (3, 5 и 7) равна 26,2 нм.

Для определения значения общей толщины нанесенного железа производился также рентгеноспектральный флуоресцентный анализ (РСФА). По данным РСФА общая толщина пленок железа составила 23,4 нм.

Для расчета оптико-геометрических параметров многослойной структуры $(\text{Fe/Si})_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ были использованы эллипсометрические данные, представленные на рис. 1. На графике

Таблица 1

Результаты анализа поперечного среза образца методом просвечивающей электронной микроскопии

№ слоя	Наименование	Толщина, нм
1	Подложка Si	–
2	SiO_2	1,5
3	Fe	10,4
4	Si	1,7
5	Fe	7,5
6	Si	1,7
7	Fe	8,3
8	Si защитный слой	30
9	Клей	–

Чтобы оценить толщину оксидного слоя по данным одноволновой эллипсометрии была применена однослойная модель изотропной пленки с идеальными границами раздела. В вычислениях использовались известные из литературы данные о комплексном показателе преломления для SiO_2 ($n = 1,457$) [7] и оптические постоянные кремниевой подложки ориентации (100) $n = 3,872$ и $k = 0,016$ [8]. В результате расчета получаем толщину 1,6 нм при угле падения излучения $\varphi = 69,08^\circ$. Данные по толщине оксида кремния хорошо согласуются со значением толщины, полученным методом просвечивающей электронной микроскопией (ПЭМ) ($d_{\text{SiO}_2} = 1,5$ нм).

Для расчета изменения показателей преломления и поглощения синтезируемых пленок формировалась семислойная модель, где каждый слой представляет собой изотропную однородную пленку с идеальными границами раздела. Найденные значения оптико-геометрических характеристик каждого предыдущего слоя используются для расчета характеристик последующего. Принимая во внимание специфику работы используемого программой алгоритма, а также численного метода, применяемого для расчета, мы использовали набор нулевых приближений для старта вычислительных процедур: $N_{\text{Fe}} = (2,5 - 2,9) - (2,9 - 3,2)i$ для железа [9] и $N_{\text{Si}} = (3,4 - 3,8) - (0,4 - 0,9)i$ для аморфного кремния [8].

При расчете для каждого последующего слоя использовались значения медиан толщины и комплексного показателя преломления, рассчитанных для предыдущего слоя. Таким образом, были получены следующие значения: $d_{\text{Fe}3} = 10,7$ нм, $d_{\text{Si}4} = 3,6$ нм, $d_{\text{Fe}5} = 7,3$ нм, $d_{\text{Si}6} = 3,1$ нм, $d_{\text{Fe}7} = 5,2$ нм, $d_{\text{Si}8}$ защитный слой = 32,4 нм. Общая толщина Fe/Si пленки (слоев 2–7) составила 29,9 нм. Общая толщина слоев Fe (3, 5 и 7) составила 23,2 нм.

Как видно, полученные результаты расчетов толщины хорошо согласуются с данными по толщине для двух слоев железа – первого и второго (табл. 1), а также для толщины защитного слоя кремния, полученными в результате обработки изображения ПЭМ (рис. 1). Однако они имеют плохую согласованность со значением толщины третьего слоя железа и двух кремниевых прослоек.

К разнице результатов по определению толщин кремниевых прослоек могла привести большая погрешность определения толщины по данным просвечивающей микроскопии, так как кремний достаточно активно участвует в процессах силицидообразования на границах раздела железа и кремния. Так, в работе [10] показано, что интерфейс на границе Si-на-Fe составляет порядка 1,3 нм, а на границе Fe-на-Si – 0,7 нм, т.е. часть кремния может уходить на формирование фаз силицида, тем самым сокращая объем чистого кремния.

Таблица 2

Сравнение значений толщины слоев структуры $(\text{Fe/Si})_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$, полученных методами эллипсометрии и ПЭМ

Слой	Толщина по ПЭМ, нм	Толщина по эллипсометрии, нм
2 – SiO ₂	1,5	1,6
3 – Fe	10,4	10,7
4 – Si	1,7	3,2
5 – Fe	7,5	7,3
6 – Si	1,7	2,8
7 – Fe	8,3	5,2
8 – Si	30	32,4

На рис. 3 приводится изображение ПЭМ поперечного среза в меньшем увеличении. Хорошо видна неравномерность покрытий по толщине:

толщина третьего слоя может быть как меньше, так и больше толщины второго слоя железа.

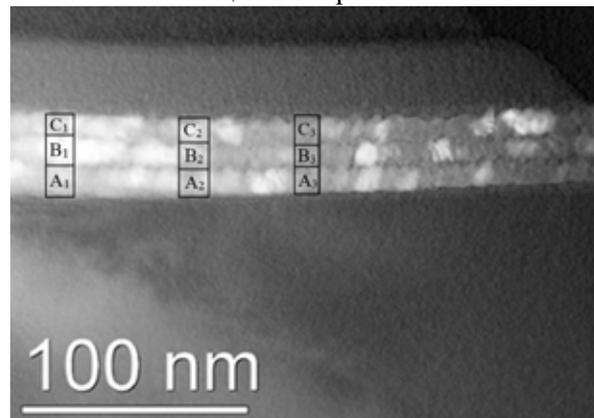


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение поперечного среза образца в инвертированном цвете. Меньший масштаб. Буквами A_{1,2,3}, B_{1,2,3}, C_{1,2,3} обозначены толщины слоев Fe в различных положениях

В табл. 3 приведены значения толщин пленок железа в трех различных положениях. Их толщина оценивалась без учета кремниевых слоев.

Таблица 3

Сравнение значений толщины слоев железа структуры $(\text{Fe/Si})_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$, извлеченных из анализа изображения, полученного методом ПЭМ (рис. 3)

	1	2	3
A	13,9 нм	12,0 нм	12,0 нм
B	13,2 нм	11,4 нм	9,1 нм
C	9,1 нм	10,9 нм	13,2 нм

Хорошо видно, что толщина пленок железа неоднородна по длине поперечного среза. Таким образом, для более качественного сравнения результатов ПЭМ и эллипсометрических вычислений необходимо брать среднее значение толщины пленок, полученных с площади около 3 мм², что является затруднительным.

Рассмотрим результаты вычислений для конечных значений показателей преломления и поглощения сформированных пленок. Полученные конечные значения для оптических постоянных ($\lambda = 632,8$ нм) пленок железа ($n_{\text{Fe}1} = 2,78$, $n_{\text{Fe}2} = 2,87$, $n_{\text{Fe}3} = 2,79$, $k_{\text{Fe}1} = 3,18$, $k_{\text{Fe}2} = 3,48$, $k_{\text{Fe}3} = 3,18$) очень близки к известным в литературе данным ($n_{\text{Fe}} = 2,90$, $k_{\text{Fe}} = 3,07$) [9] и незначительно отличаются друг от друга.

В свою очередь, пленки кремния характеризуются значительным отличием вычисленных оптических постоянных. Так, первый слой крем-

ния имеет несвойственный ему высокий показатель поглощения $k_{Si_1} = 1,26$, а показатель преломления очень близок к показателю преломления железа $n_{Si} = 2,71$. Мы предполагаем, что данный слой представляет собой градиентный твердый раствор железа-кремния и силицидов железа, с большим содержанием железа вблизи межслойной границы. Наличие переходных слоев подтверждается исследованиями методом малоуглового рентгеновского рассеяния [10]. Второй слой кремния характеризуется более близкими к показателям преломления и поглощения аморфного кремния $n_{Si_2} = 3,25$, $k_{Si_2} = 0,43$ [8]. А третий слой наиболее близко соответствует оптическим свойствам аморфного кремния $n_{Si_3} = 2,85$ и $k_{Si_3} = 0,25$. Что логично, поскольку его толщина слишком велика для того, чтобы градиент состава у межслойной границы мог оказывать существенное влияние на оптические свойства рассматриваемой пленки.

Заключение

Таким образом, в результате анализа данных одноволновой лазерной эллипсометрии, полученных в процессе формирования структуры $[Si/Fe^{57}/Fe^{56}]_3/SiO_2/Si(100)$ и последующего ее исследования методом ПЭМ, были получены

сведения об оптических и структурных свойствах данной структуры. Рассчитанные значения конечной толщины сформированных пленок хорошо согласуются с результатами РСФА исследований. Общая толщина сформированных слоев железа по результатам эллипсометрии составляет 23,2 нм, по результатам РСФА – 23,4 нм. Небольшое отличие в толщине слоев по данным ПЭМ ($d_{Fe} = 26,2$ нм) связано, по всей видимости, с особенностями экспериментальных методов. Эллипсометрия и РСФА относятся к интегральным методам анализа, в то время как ПЭМ – метод локального анализа.

Показано, что формирование пленок железа в структурах данного типа носит сложный характер с разнообразием процессов эволюции морфологии поверхности. При этом обнаруживается сильная зависимость структурных и оптических свойств слоев железа от качества поверхности, на которую выполняется осаждение материала.

Согласно изменению оптических свойств в процессе роста, кремниевые прослойки с толщиной около 2 нм представляют неоднородную по составу матрицу, содержащую аморфный кремний и характеризующиеся высоким коэффициентом поглощения твердые растворы и аморфные формирования системы Fe/Si.

Работа выполнена при финансовой поддержке программ Президиума РАН № 32, проект 0356-2018-0061, Министерства образования и науки Российской Федерации и Сибирского отделения Российской академии наук, проект П.8.70.

Список литературы

- [1] Ovchinnikov S. G., Varnakov S. N., Lyashchenko S. A., Tarasov I. A., Yakovlev I. A., Popov E. A., Zharkov S. M., Velikanov D. A., Tarasov A. S., Zhandun V. S., Zamkova N. G. Iron silicide-based ferromagnetic metal/semiconductor nanostructures // *Physics of the Solid State*, 2016, vol. 58, issue 11, pp. 2277–2281.
- [2] Tokushige H., Endo T., Hiidome K., Saiki K., Kitamura Sh., Katsuyama T., Ikeda N., Sugimoto Yo., Maeda Yo. Photonic crystals composed of β -FeSi₂ with amorphous Si cladding layers // *Japanese Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 54, no. 7S2.
- [3] Makita Yu., Ootsuka T., Fukuzawa Ya., Otagawa N., Abe H., Liu Zh., Nakayama Ya. β -FeSi₂ as a Kankyo (Environmentally Friendly) semiconductor for solar cells in the space application // *Proceedings of SPIE*, 2006, vol. 6197. doi: 10.1117/12.664009
- [4] Tarasov I. A., Popov Z. I., Varnakov S. N., Molokeyev M. S., Fedorov A. S., Yakovlev I. A., Fedorov D. A., Ovchinnikov S. G. Optical characteristics of an epitaxial Fe₃Si/Si(111) iron silicide film // *JETP Letters*, 2014, vol. 99, issue 10, pp. 565–569.
- [5] Спесивцев Е. В., Рыхлицкий С. В., Швец В. А. Развитие методов и средств оптической эллипсометрии в Институте физики полупроводников СО РАН // *Автоматрия*. 2011. № 5. С. 5.
- [6] Свид. 2013619178 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Система обработки и анализа данных одноволновой кинетической эллипсометрии (SingleW) / И. А. Тарасов, С. А. Лященко, С. Н. Варнаков, С. Г. Овчинников, И. А. Яковлев, Н. Н. Косырев ; заявитель и правообладатель Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (RU) ; заявл. 08.07.2013 ; опубл. 20.12.2013.
- [7] Воронкова Е. М., Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И. и др. Оптические материалы для инфракрасной техники. М. : Наука, 1965. 346 с.
- [8] Thutupalli G. K. M., Tomlin S. G. The optical properties of amorphous and crystalline silicon // *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 1977, vol. 10, P. 467.

- [9] Johnson P. B., Christy R. W. Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni and Pd // Physical Review B, 1973, vol. 9, pp. 5056–5070.
- [10] Naik S. R., Rai S., Chattopadhyay M. K., Sharma V. K., Majumdar S., Lodha G. S. Structural and transport properties of ferromagnetically coupled Fe/Si/Fe trilayers // Journal of Applied Physics, 2008, vol. 104, issue 6, P. 063525.

ELLIPSOMETRIC CONTROL OF PARAMETERS OF MULTILAYER Fe/Si NANOSTRUCTURES DURING GROWTH

I. A. Tarasov¹, I. A. Yakovlev¹, S. N. Varnakov¹, S. M. Zharkov^{1, 2},
S. G. Ovchinnikov^{1, 2}

¹Kirensky Institute of Physics SB RAS, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Using in situ single-wave laser ellipsometry method, the formation of the [Si/Fe⁵⁷/Fe⁵⁶]₃/SiO₂/Si(100) multilayer structure was studied. Information about the optical and structural properties of this structure was obtained. The change in the morphology of the surface of the growing layers and their optical characteristics are not identical for the cases of iron deposition on the surface of the silicon layer and deposition of silicon on the surface of the iron layer. The refractive index and coefficient of absorption indicate an increase of the thickness of transition layers containing iron-silicon solid solutions and silicides. The nature of the change in the optical constants become more complicated with each subsequent iron layer deposited on the silicon surface. The behavior of n and k profiles corresponding to the formation of silicon layers is simpler than the behavior of similar iron profiles. These profiles have only some features at the initial stages of growth and correspond to the formation of amorphous silicon layers. The obtained data are consistent with the data of transmission electron microscopy.

Keywords: ellipsometry, iron silicides, multilayer Fe/Si nanostructures.

References

- [1] Ovchinnikov S. G., Varnakov S. N., Lyashchenko S. A., Tarasov I. A., Yakovlev I. A., Popov E. A., Zharkov S. M., Velikanov D. A., Tarasov A. S., Zhandun V. S., Zamkova N. G. Iron silicide-based ferromagnetic metal/semiconductor nanostructures // Physics of the Solid State, 2016, vol. 58, issue 11, pp. 2277–2281.
- [2] Tokushige H., Endo T., Hiidome K., Saiki K., Kitamura Sh., Katsuyama T., Ikeda N., Sugimoto Yo., Maeda Yo. Photonic crystals composed of β -FeSi₂ with amorphous Si cladding layers // Japanese Journal of Applied Physics, 2015, vol. 54, no. 7S2.
- [3] Makita Yu., Ootsuka T., Fukuzawa Ya., Otagawa N., Abe H., Liu Zh., Nakayama Ya. β -FeSi₂ as a Kankyo (Environmentally Friendly) semiconductor for solar cells in the space application // Proceedings of SPIE, 2006, vol. 6197. doi: 10.1117/12.664009
- [4] Tarasov I. A., Popov Z. I., Varnakov S. N., Molokeev M. S., Fedorov A. S., Yakovlev I. A., Fedorov D. A., Ovchinnikov S. G. Optical characteristics of an epitaxial Fe₃Si/Si(111) iron silicide film // JETP Letters, 2014, vol. 99, issue 10, pp. 565–569.
- [5] Spesivtsev E. V., Rykhlytsky S. V., Shvets V. A. *Razvitie metodov i sredstv opticheskoy ehllipsometrii v Institute fiziki poluprovodnikov SO RAN* [Development of methods and means of optical ellipsometry at the Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences] // Autometry, 2011, no. 5, P. 5. (In Russian)
- [6] Tarasov I. A., Lyashchenko S. A., Varnakov S. N., Ovchinnikov S. G., Yakovlev I. A., Kosyrev N. N. *Sistema obrabotki i analiza dannyh odnovolnnoy kineticheskoy ehllipsometrii (SingleW)* [System for processing and analyzing single-wavelength kinetic ellipsometry (SingleW)] // The Certificate on Official Registration of the Computer Program, no. 2013619178, 2013.
- [7] Voronkova E. M., Voronkova E. M., Grechushnikov B. N., Distler G. I. *Opticheskie materialy dlya infrakrasnoj tekhniki* [Optical materials for infrared technology]. Moscow, Science, 1965, 346 p. (In Russian)
- [8] Thutupalli G. K. M., Tomlin S. G. The optical properties of amorphous and crystalline silicon // Journal of Physics C: Solid State Physics, 1977, vol. 10, P. 467.
- [9] Johnson P. B., Christy R. W. Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni and Pd // Physical Review B, 1973, vol. 9, pp. 5056–5070.
- [10] Naik S. R., Rai S., Chattopadhyay M. K., Sharma V. K., Majumdar S., Lodha G. S. Structural and transport properties of ferromagnetically coupled Fe/Si/Fe trilayers // Journal of Applied Physics, 2008, vol. 104, issue 6, P. 063525.

СИНТЕЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МАХ-ФАЗЫ Ti_3SiC_2 , СОДЕРЖАЩЕЙ БОРИДЫ

Н. И. Афанасьев ✉, О. К. Лепакова

Томский научный центр СО РАН, г. Томск, Российская Федерация

Исследованы микроструктура, фазовый состав и жаростойкость МАХ-фазы Ti_3SiC_2 и композиционного наноламинатного соединения Ti_3SiC_2 -В, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в режиме послойного горения. Процесс синтеза проводили в бомбе постоянного давления в атмосфере аргона. Волну безгазового горения инициировали раскаленной вольфрамовой спиралью. Максимальную температуру горения определяли вольфрам-рениевой термопарой ВР5-ВР20.

Фазовый состав и структурные параметры полученных материалов определяли на дифрактометрах Shimadzu XRD-6000 (CuK_α -излучение) и ДРОН-2 ($CoK\alpha$ -излучение). Количественный фазовый анализ проводили с помощью программы POWDER CELL 2,4. Для изучения микроструктуры использовали оптический (Axiovert 200M, Karl Zeiss) микроскоп.

Установлено, что бор не входит в состав твердого раствора МАХ-фазы при концентрации менее 0,2 мол. %. Продукты с содержанием бора более 0,2 мол. % содержат дисперсные частицы диборида титана, располагающиеся между пластинами МАХ-фазы. Проведенные испытания на жаростойкость при температуре 1373 К показали, что исследованные в работе композиционные материалы на основе соединения Ti_3SiC_2 соответствуют жаростойкости стехиометрической фазы и превосходят по жаростойкости сплавы системы Ni-Cr-Al-Y, широко используемые для защиты деталей газотурбинного двигателя. Абразивная износостойкость композиционного материала в 1,6 раза выше, чем у МАХ-фазы и в 2,8 раза превосходит износостойкость сплава Ni-Cr-Al-Y. Полученные материалы перспективны для использования в качестве жаростойких и износостойких покрытий.

Ключевые слова: МАХ-фаза, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, фазовый состав, жаростойкость.

Введение

Материалы на основе соединения Ti_3SiC_2 с наноламинатной структурой сочетают в себе свойства керамики и металлов, характеризуются высокими значениями модулей упругости (326 ГПа) и сдвига (135 ГПа), значительными вязкостью разрушения ($7 \div 12$ МПа·м^{0,5}), прочностью, трещиностойкостью, термостойкостью, химической стойкостью и низкой плотностью (4,52 г/см³) [1–6].

В работе [7] на основе неэмпирического метода функционала электронной плотности показано влияние примесей азота, кислорода и бора на параметры решетки, локальные искажения, стабильность и электронную структуру силикокарбида Ti_3SiC_2 . Указанные выше примеси могут оказывать влияние на фазовый состав, структуру и физико-механические свойства синтезируемых материалов.

Целью настоящего исследования являлось изучение фазового состава, микроструктуры и жаростойкости композитов на основе Ti_3SiC_2 , полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) при частичной замене атомов углерода в кристаллической решетке Ti_3SiC_2 атомами бора.

Материалы и методы исследования

В работе были изучены продукты СВ-синтеза составов 3Ti-1,2Si-2C, 3Ti-1,2Si-(1,9C + 0,1B), 3Ti-1,2Si-(1,8C + 0,2B), 3Ti-1,2Si-(1,5C + 0,5B).

Титанокремнистый карбид Ti_3SiC_2 получали синтезом из элементов в режиме послойного горения, используя химическую реакцию



Т. к. в процессе синтеза часть кремния, обладающего высокой упругостью паров, испаряет-

✉ af42@yandex.ru

ся, то кремний вводили с избытком 15–20 масс. % относительно стехиометрического состава.

Для приготовления реакционных смесей использовали просушенные в вакууме при температуре 200 °С в течение двух часов порошки титана марки ТПП 8 (ОАО «Ависма», г. Березники), кремния марки КР-1 (< 20 мкм) и углерода (сажа марки ПМ75 с размером частиц < 0,033 мкм). Порошки тщательно перемешивали в фарфоровой ступке. Из приготовленных смесей на гидравлическом прессе формовали пористые (40–45 %) цилиндрические образцы диаметром 20 и длиной 30–32 мм. Процесс СВС проводили в бомбе постоянного давления в атмосфере аргона. Волну безгазового горения инициировали раскаленной вольфрамовой спиралью. Максимальную температуру горения определяли вольфрам-рениевой термопарой ВР5-ВР20 толщиной 100 мкм. Сигнал от термопары поступал на вход АЦП и фиксировался в памяти компьютера.

Фазовый состав и структурные параметры полученных материалов определяли на дифрактометрах Shimadzu XRD-6000 ($\text{CuK}\alpha$ -излучение) и ДРОН-2 ($\text{CoK}\alpha$ – излучение). Количественный фазовый анализ проводили с помощью программы POWDER CELL 2,4. Для изучения микроструктуры использовали оптический (Axiovert 200M, Karl Zeiss) микроскоп.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены микроструктуры СВ-синтезированных образцов составов $3\text{Ti}-1,2\text{Si}-2\text{C}$ (а) и $3\text{Ti}-1,2\text{Si}-(1,5\text{C} + 0,5\text{B})$ (б). Образец состава $3\text{Ti}-1,2\text{Si}-2\text{C}$ состоит в основном из пластинчатых кристаллов Ti_3SiC_2 и округлых частиц TiC (~ 15 масс. %). При добавлении бора в составе синтезированных продуктов идентифицируется диборид титана, который наряду с карбидом титана располагается в основном в промежутках между пластинчатыми кристаллами МАХ-фазы Ti_3SiC_2 (рис. 1б).

На рис. 2 приведены дифрактограммы синтезированных продуктов системы $3\text{Ti}-1,2\text{Si}-2(\text{C},\text{B})$.

Как следует из анализа дифрактограмм, диборид титана идентифицируется только в продуктах с содержанием бора 0,2 и 0,5 мол. %. Образцы системы $3\text{Ti}-1,2\text{Si}-2(\text{C},\text{B})$, полученные методом СВС с различным содержанием бора в исходной шихте, были испытаны на жаростойкость. Жаростойкость оценивали по привесу окисленных на воздухе образцов в электропечи на основании ГОСТ 6130-71. Исследования проводили при температуре 1373 К, продолжительность выдержки составляла 30 часов. Привес образцов определяли на аналитических весах с точностью 10^{-4} г. (табл. 1). В таблице для сравнения приведены данные по жаростойкости сплава Ni-Cr-Al-Y.

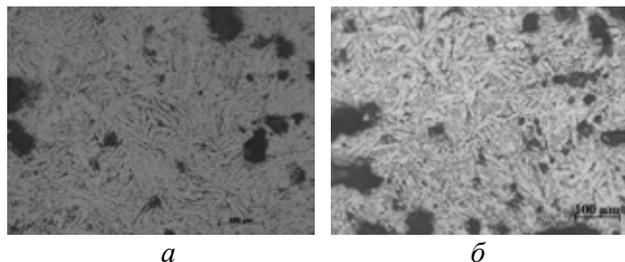


Рис. 1. Микроструктуры синтезированных продуктов составов: (а) – $3\text{Ti}-1,2\text{Si}-2\text{C}$, (б) – $3\text{Ti}-1,2\text{Si}-(1,9\text{C} + 0,5\text{B})$

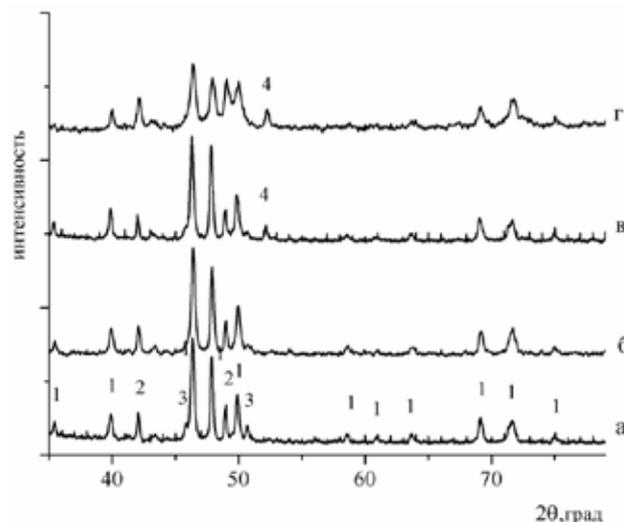


Рис. 2. Дифрактограммы СВ-синтезированных продуктов составов: а – $3\text{Ti}-1,2\text{Si}-2\text{C}$, б – $3\text{Ti}-1,2\text{Si}-(1,9\text{C} + 0,1\text{B})$, в – $3\text{Ti}-1,2\text{Si}-(1,8\text{C} + 0,2\text{B})$, г – $3\text{Ti}-1,2\text{Si}-(1,5\text{C} + 0,5\text{B})$. 1 – Ti_3SiC_2 , 2 – TiC , 3 – TiSi_2 , 4 – TiB_2

Как видно из табл. 1, привес для изученных образцов составил 20–30 г/м². Однако, по данным рентгенофазового анализа (рис. 3) в образцах, подвергнутых окислению на воздухе, оксидов не обнаружено. Возможно, привес связан с окислением тонких поверхностных слоев образцов.

Сравнение с данными по окислению сплава Ni-Cr-Al-Y (табл. 1), показало, что все исследованные в работе образцы обладают более высокой жаростойкостью.

Таблица 1

Окисление СВС-композиата состава $3\text{Ti}-1,2\text{Si}-2(\text{C},\text{B})$

Содержание бора в исходной шихте, мол. %	Привес ($\Delta m/s$), г/м ²
0	23
0,1	31
0,2	24
0,5	21
Ni-Cr-Al-Y	44

Таблица 2

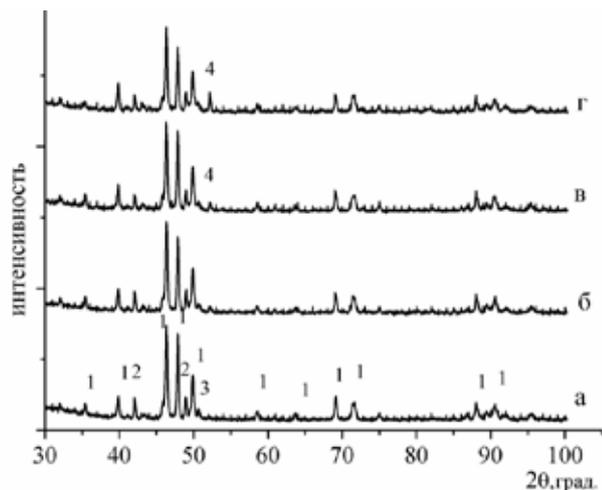


Рис. 3. Дифрактограммы образцов с различным содержанием бора, подвергнутых окислению при температуре 1373 К в течение 30 часов.
1 – Ti_3SiC_2 , 2 – TiC , 3 – $TiSi_2$, 4 – TiB_2

Проведенные исследования показали, что пористые СВС-композиционные материалы на основе наноламината $Ti_3Si(CB)_2$ при температуре 1373 К обладают более высокой жаростойкостью по сравнению со сплавом на основе Ni-Cr-Al-Y, который широко используется в качестве защитных покрытий деталей газотурбинного двигателя из жаропрочных суперсплавов на основе никеля [8–11].

В табл. 2 приведены коэффициенты относительной абразивной износостойкости исследованных материалов и эталона. В качестве эталона использовали Ст. 45. Для сравнения в таблице приведен коэффициент относительной износостойкости сплава системы Ni-Cr-Al-Y, полученного методом вакуумной плазменной технологии [12].

Список литературы

- [1] Faber L., Barsoum M. W., Zavaliangos A., El-Raghy T. Dislocations and Stacking Faults in Ti_3SiC_2 // Journal of the American Ceramic Society, 1998, no. 6, pp. 1677–1681.
- [2] Barsoum M. W. The Mn+1AXn phases: A new class of solids. Thermodynamically Stable nanolaminates // Progress in Solid State Chemistry, 2000, no. 28, pp. 201–281.
- [3] Barsoum M. W., El-Raghy T., Radovic M. Ti_3SiC_2 : a layered machinable ductile carbide // InterCeram, 2000, vol. 49.
- [4] Li J. F., Pan W., Sato F., Watanabe R. Mechanical properties of polycrystalline Ti_3SiC_2 at ambient and elevated temperatures // Acta Materialia, 2001, no. 49, pp. 937–945.
- [5] Sun Z. M., Murugaiah A., Zhen T., Zhou A., Barsoum M. W. Microstructure and mechanical properties of porous Ti_3SiC_2 // Acta Materialia, 2005, no. 53, pp. 4359–4366.
- [6] Barsoum M. W., El-Raghy T. The MAX Phases: Unique New Carbide and Nitride Materials // American Scientist, 2001, vol. 89, no. 4, pp. 334–343.
- [7] Медведева Н. И. Влияние примесей бора, азота, кислорода на электронную структуру и деформационное поведение Ti_3SiC_2 // Физика твердого тела. 2013. Т. 55. Вып. 3. С. 500–503.
- [8] Шалин Р. Е. Жаропрочные сплавы для газовых турбин. М.: Металлургия, 1981. 480 с.
- [9] Афанасьев Н. И., Бушнев Л. С., Колобов Ю. Р. Влияние жаростойкого покрытия на деградацию микроструктуры сплава ЖС6У // Изв. вузов. Физика. 1986. № 12. С. 109–111.
- [10] Eds Sims Ch. T., Stoloff N. S., Hagel W. C. Superalloys. New York, John Wiley & Sons Inc., 2007, 384 p.
- [11] Gons M. Ion Implantation into metals to prevent high temperature oxidation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1983, vol. 209–210, pp. 841–847.
- [12] Добровольский А. Г., Кошеленко П. И. Абразивная износостойкость материалов. Киев: Тэхника, 1989. 120 с.

Относительная абразивная износостойкость покрытий

№ п/п	Материал покрытия	$K_{и}$
1	Эталон Ст. 45	1,0
2	Ni-(19-23)Cr-(9-11)Al-(0,15-0,4)Y	3,8
3	Ti_3SiC_2	5,9
4	$Ti_3Si(CB)_2$	9,6

Коэффициент относительной износостойкости $K_{и}$ рассчитывали по формуле [13]:

$$K_{и} = (\Delta m_3 \times \rho_{и}) / (\Delta m_{и} \times \rho_3),$$

где Δm_3 , $\Delta m_{и}$ – потеря массы эталонного и испытываемого образцов, соответственно; $\rho_{и}$, ρ_3 – плотность эталона и испытываемого образца.

Заключение

Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в режиме послыонного горения получена МАХ-фаза Ti_3SiC_2 и композиционный материал Ti_3SiC_2 - TiB_2 . В составе МАХ-фазы наблюдаются карбиды и дисилициды титана. Установлено, что бор не входит в состав МАХ-фазы, а образует дисперсные частицы диборида титана. Жаростойкость композиционного материала вдвое выше сплава Ni-Cr-Al-Y и соответствует уровню жаростойкости МАХ-фазы. Абразивная износостойкость композиционного материала в 1,6 раза выше, чем у МАХ-фазы и в 2,8 раза превосходит износостойкость сплава Ni-Cr-Al-Y.

THE SYNTHESIS OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON
MAX-PHASE Ti_3SiC_2 CONTAINING BORIDES

N. I. Afanasyev, O. K. Lepakova

Tomsk Scientific Centre SB RAS, Tomsk, Russian Federation

The microstructure, phase composition, and heat resistance of MAX-phase Ti_3SiC_2 and the composite nanolaminate compound Ti_3SiC_2 -B obtained by the method of self-propagating high-temperature synthesis in layer-burning mode are investigated. The synthesis process was carried out in a constant pressure bomb in an argon atmosphere. A wave of gasless burning was initiated by a red-hot tungsten spiral. The maximum burning temperature was determined by tungsten-rhenium thermocouple W + 5% Re-W + 20% Re.

The phase composition and structural parameters of the obtained materials were determined on Shimadzu XRD-6000 diffractometers (CuK_α radiation) and DRON-2 (CoK_α radiation). Quantitative phase analysis was performed using the POWDER CELL 2,4 program. An optical microscope (Axiovert 200M, Karl Zeiss) was used to study the microstructure.

It was established that boron is not included in the composition of the MAX solid solution at a concentration of less than 0,2 mol. %. Products with a boron content of more than 0,2 mol. % contain dispersed particles of titanium diboride located between the MAX-phase plates. The tests for heat resistance at a temperature of 1373 K showed that the composite materials based on the Ti_3SiC_2 compound studied in this work correspond to the heat resistance of the stoichiometric phase and surpass the Ni-Cr-Al-Y system alloys, which are widely used to protect parts of a gas turbine engine. The abrasive wear resistance of the composite material is 1,6 times higher than that of the MAX-phase and 2,8 times higher than the wear resistance of the Ni-Cr-Al-Y alloy. The resulting materials are promising for use as heat-resistant and wear-resistant coatings.

Keywords: MAX phase, self-propagating high-temperature synthesis, phase composition, heat resistance.

References

- [1] Faber L., Barsoum M. W., Zavaliangos A., El-Raghy T. Dislocations and Stacking Faults in Ti_3SiC_2 // Journal of the American Ceramic Society, 1998, no. 6, pp. 1677–1681.
- [2] Barsoum M. W. The Mn+1AX_n phases: A new class of solids. Thermodynamically Stable nanolaminates // Progress in Solid State Chemistry, 2000, no. 28, pp. 201–281.
- [3] Barsoum M. W., El-Raghy T., Radovic M. Ti_3SiC_2 : a layered machinable ductile carbide // Interceram, 2000, vol. 49, no. 4, pp. 226–233.
- [4] Li J. F., Pan W., Sato F., Watanabe R. Mechanical properties of polycrystalline Ti_3SiC_2 at ambient and elevated temperatures // Acta Materialia, 2001, no. 49, pp. 937–945.
- [5] Sun Z. M., Murugaiah A., Zhen T., Zhou A., Barsoum M. W. Microstructure and mechanical properties of porous Ti_3SiC_2 // Acta Materialia, 2005, no. 53, pp. 4359–4366.
- [6] Barsoum M. W., El-Raghy T. The MAX Phases: Unique New Carbide and Nitride Materials // American Scientist, 2001, vol. 89, no. 4, pp. 334–343.
- [7] Medvedeva N. I. Vliyaniye primesej bora, azota, kisloroda na ehlektronnyuyu strukturu i deformacionnoye povedeniye Ti_3SiC_2 [Effect of impurities of boron, nitrogen, oxygen on the electronic structure and deformation behavior of Ti_3SiC_2] // Solid State Physics, 2013, vol. 55, issue 3, pp. 500–503. (In Russian)
- [8] Shalin R. E. Zharoprochnyye splavy dlya gazovykh turbin [Heat-resistant alloys for gas turbines]. Moscow, Metallurgy, 1981, 480 p. (In Russian)
- [9] Afanasyev N. I., Bushnev L. S., Kolobov Yu. R. Vliyaniye zharostojkogo pokrytiya na degradatsiyu mikrostruktury splavy ZHS6U [Effect of a heat-resistant coating on the degradation of the microstructure of the ZhS6U alloy] // Izv. universitetov. Physics, 1986, no. 12, pp. 109–111. (In Russian)
- [10] Eds Sims Ch. T., Stoloff N. S., Hagel W. C. Superalloys. New York, John Wiley & Sons Inc., 2007, 384 p.
- [11] Gons M. Ion Implantation into metals to prevent high temperature oxidation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1983, vol. 209–210, pp. 841–847.
- [12] Dobrovolsky A. G., Koshelenko P. I. Abrazivnaya iznosostojkost' materialov [Abrasive wear resistance of materials]. Kiev, Tekhnika, 1989, 120 p. (In Russian)

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ: ИСТОРИЯ, СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ

О. П. Пчеляков ✉

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация*

Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация

В настоящей работе рассмотрены предпосылки, история реализации и перспективы синтеза многослойных полупроводниковых композиций из молекулярных пучков в условиях орбитального полета космических аппаратов. Показаны преимущества проведения технологического процесса в глубоком вакууме, образующемся в результате проявления эффекта молекулярного экрана для получения новых тонкопленочных материалов с уникальными свойствами. Описан наземный имитатор космического модуля и действующий макет молекулярного экрана. Обсуждаются особенности эскизного проекта универсальной автоматизированной установки молекулярно-лучевой эпитаксии. Современные высокоэффективные солнечные элементы представляют собой сложные многослойные гетеросистемы. Они состоят из трех основных р-п переходов, выполненных из Ge, InGaAs, InGaP и соединенных последовательно туннельными диодами. Поскольку эти материалы совместимы по постоянной кристаллической решетки, гетероструктуры для солнечных элементов на их основе выращиваются в едином ростовом процессе на германиевом р-п переходе-подложке или на арсениде галлия. Все большее применение в этом процессе находят нанотехнологии. Самый современный мировой рекорд по эффективности трехпереходных солнечных батарей с КПД вплоть до 44,5 % при интенсивностях солнечного излучения в несколько сотен солнц достигнут находящейся в «Кремниевой долине» фирмой Solar Junction при использовании молекулярной эпитаксии. В ИФП СО РАН ведутся работы по созданию высокопроизводительной и недорогой аппаратуры для сверхвысоковакуумной технологии молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур для солнечных элементов с применением космических технологий.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, полупроводниковые наногетероструктуры, солнечные элементы, сверхвысокий вакуум, космическое материаловедение.

Введение

Одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений космического полупроводникового материаловедения является разработка наукоемких технологий, связанных с использованием глубокого и чистого вакуума, образующегося в открытом космосе вблизи орбитальных станций при использовании эффекта «молекулярного экрана». К таким технологиям в первую очередь относятся молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) с тигельными и газовыми источниками молекулярных пучков. Промышленная реализация метода МЛЭ убедительно показала, что он является лучшим

методом получения многослойных эпитаксиальных структур с гладкостью границ на атомарном уровне, прецизионно заданной толщиной слоев, составом и профилем легирования. Работы по созданию специализированной технологической установки МЛЭ для эксплуатации в кильватерной области молекулярного защитного экрана (МЗЭ) в условиях орбитального полета космических аппаратов направлены на преодоление физических ограничений наземных вакуумных технологий. Эти ограничения связаны с высокой сложностью дальнейшего улучшения достигнутых на сегодняшний день в наземных установках предельных параметров откачных средств и чистоты вакуумной среды. Кроме того, в сравнительно небольших по размерам наземных вакуумных объемах неизбежно влияние эффекта накопления распыляемых

✉ pchome@mail.ru

материалов и примесей на развитой поверхности стенок и вакуумной оснастки. Неконтролируемое реиспарение этих материалов в процессе эпитаксии делает невозможным решение таких важных проблем, как получение особоочистых, высоко-совершенных и однородных по площади многослойных гетероструктур с резкими межслоевыми границами на основе полупроводниковых соединений типа А4В4, А3В5 и А2В6. На кремниевых пластинах большого диаметра такие эпитаксиальные структуры могли бы сыграть роль альтернативных универсальных подложек для получения широкого круга гетероструктур для приборов опто-, микро- и наноэлектроники. Разработка и реализация этого нового поколения полупроводниковых структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии приведет к революционизирующим изменениям всей элементной базы отечественной электроники. На основе таких структур предполагается также изготавливать изделия полупроводниковой техники, в том числе для высокоэффективных преобразователей солнечной энергии и термофотоэлектрических генераторов.

1. Основные предпосылки и современное состояние проблемы

Как показывает анализ работ, опубликованных в научной печати и в сети Internet, данная проблема полупроводникового материаловедения, связанная с выносом высоковакуумных технологий в открытое космическое пространство, имеет как фундаментальный, так и прикладной характер. Ее решение определит прогресс не только в изучении процессов получения тонкопленочных кристаллических покрытий и многослойных гетероструктур при их выращивании из молекулярных пучков в сверхглубоком вакууме, но и в развитии технологической базы и интегрированных производств полупроводниковой электроники XXI века [5]. В настоящее время подобные работы ведутся только в США и в России. Впервые эти исследования были инициированы в 1989 году Центром эпитаксии в космическом вакууме (Хьюстонский университет, США). В России они были начаты в 1996 году отделом молекулярной эпитаксии ИФП СО РАН в сотрудничестве с РКК «Энергия» им. С. П. Королева в рамках программы «Эпитаксия» и проекта «Экран».

Идея использования молекулярного экрана для получения ультравысокого вакуума на низких орбитах принадлежит американским ученым, которые при поддержке НАСА провели теоретический анализ состояния газовой среды вокруг летящего в пространстве полусферического экрана [6] и сформулировали концепцию орбитальной лаборатории со сверхразреженной средой [7; 8]. Следует также

отметить, что агентством НАСА еще в 1980-е годы в рамках программы SpaceLab планировалась разработка восьми установок многоразового использования для получения новых материалов в космосе и среди них был «молекулярный экран». Однако отсутствие в то время интереса к этому устройству со стороны промышленности привело к исключению данной работы из пятилетнего плана НАСА на 1980–1984 гг. Вновь эта идея была предложена для проведения экспериментов по молекулярно-лучевой эпитаксии А. Игнатьевым и Ц. В. Чу (А. Ignatiev, С. W. Chu) в 1985 году [7]. В 1988 году при Хьюстонском университете был открыт Центр по эпитаксии в космосе, и в 1989 году началась реализация программы этих исследований. В рамках программы «Wake Shield Facility» (WSF) после четырехлетнего периода наземных исследований в 1994–1996 годах были осуществлены первые эксперименты в космосе по синтезу эпитаксиальных структур на основе арсенида галлия [7]. С 1999 года к финансированию этой программы подключилась коммерческая компания Spacelab, которая вложила 275 миллионов долларов в космические проекты, обещающие прибыль. В 2000 году в расширение Центра по эпитаксии в космосе (г. Хьюстон) было вложено более 15 миллионов долларов [9]. Следующий полет многоразового модуля с установкой WSF на борту был осуществлен в конце 2001 года. Целью дальнейшей программы являлось создание к 2005 году минифабрики на орбите по получению эпитаксиальных пленок с рекордными характеристиками для приборов опто-, микро- и наноэлектроники. Производительность такой установки предполагалось довести до 3500 пластин в год, что обеспечивало производство около 10 миллионов приборных структур.

В основе коммерциализации проекта была заложена высокая производительность установки, качество и воспроизводимость параметров структур при их индивидуальной обработке. Расчеты А. Игнатьева показывали, что производство приборных структур в космосе окупит затраты на транспортировку материалов и даст прибыль. Кроме того, придавалось большое значение возможности проведения уникальных исследований с использованием автоматизированной установки МЛЭ в условиях чистого сверхглубокого вакуума в космосе для разработки новых сверхчистых материалов.

Результаты первых трех экспериментов проекта WSF и принятая программа дальнейших работ по промышленному производству эпитаксиальных материалов в космосе подтвердили перспективность развития этой новой космической технологии полупроводникового материаловедения. Однако продолжение американских экспериментов в космосе было остановлено после

катастрофы шаттла «Колумбия» первого февраля 2003 года, в которой погибли все 7 членов экипажа. После этой трагедии А. Игнатъев с коллективом своих сотрудников присоединился к проекту «Эпитаксия».

2. Особенности российского проекта

В 1996 году были начаты работы по проекту «Эпитаксия гетероструктур на Si в условиях космоса» (шифр «Эпитаксия»). Основной задачей этого проекта являлось научно-техническое обоснование и наземная отработка программы и методик полетных экспериментов по получению гетероструктур для альтернативных подложек, содержащих тонкие слои дорогостоящих полупроводниковых соединений на поверхности пластин кремния большого диаметра.

Целью работы, выполняемой в рамках ОКР, являлась поэтапная разработка и создание штатного образца вакуумно-механической аппаратуры молекулярно-лучевой эпитаксии (ВМА МЛЭ) для космического эксперимента «Экран-М», который должен обеспечивать реализацию научных экспериментов и отработку технологического процесса МЛЭ. При этом рост пленок должен осуществляться в технологической сверхвысоковакуумной зоне, создаваемой на низкоорбитальных беспилотных КА в окрестности или вблизи российского сегмента (РС) международной космической станции (МКС) за МЗЭ, поверхность которого расположена перпендикулярно вектору скорости движения этого экрана.

Методические расчетные исследования уровня разрежения за защитным экраном в условиях орбитального полета пилотируемых объектов проведены сотрудниками РКК «Энергия» им. С. П. Королева [4]. Рассмотрено поперечное обтекание свободномолекулярным набегающим потоком газов верхней атмосферы на высотах 250–400 км защитного экрана в форме близкой к плоскому диску. Предполагается, что уровни газовой выделенности с «теневого» поверхности экрана в область аэродинамического следа не превышают 10^{-12} мм рт. ст. Такой уровень газовой выделенности характерен для предварительно обезгаженных металлических стенок вакуумных камер (например, из полированной нержавеющей стали), или для тонкостенных конструкций в условиях полета на теневой стороне орбиты при температурах порядка 100 К. Соответствующее парциальное давление (по атомарному кислороду) не превышает 10^{-12} мм рт. ст.

Защитный экран, ориентированный перпендикулярно к направлению полета, вырезает зону аэродинамического следа, течение в которой формируется попавшими в эту зону частицами газа из

набегающего потока и потоком частиц собственного газовой выделенности с внутренней поверхности диска. Для условий течений при больших числах Кнудсена эти потоки статистически независимы, и поэтому параметры общего течения в следе определяются их суперпозицией.

Проведен анализ изобар течения на высотах полета 250–400 км за поперечно обтекаемым экраном с учетом газовой выделенности с его поверхности и эффекта экранирования набегающего потока. Показано, что указанные выше уровни газовой выделенности в область следа за экраном незначительно влияют на конфигурацию границы области высокого вакуума. В этой области может быть выделена стабильная по углам атаки ($\alpha \leq 15^\circ$) зона. При поперечных размерах экрана ~ 3 м эта зона условно представляет цилиндрическую область с диаметром порядка 0,7 м и с протяженностью от днища экрана $\sim 1,5$ м, т.е. вполне допускает размещение в ней технологической, научной, а также контрольно-измерительной аппаратуры.

Результаты расчетов также показывают, что из окружающей среды в зону разрежения за экраном попадают только «быстрые» молекулы легких компонент верхней атмосферы (He и H), скорости теплового движения которых существенно превышают орбитальную скорость (7800 м/с). Их парциальные давления на высотах полета орбитальных кораблей и станций ($H \sim 300$ км) на пять–шесть порядков ниже по сравнению с указанным выше парциальным давлением молекул газовой выделенности. Теоретически суммарное давление в этой области, определяемое He и H, может быть менее 10^{-14} мм рт. ст. (при парциальном давлении водорода $< 10^{-14}$ мм рт. ст., гелия $< 10^{-18}$ мм рт. ст. и почти бесконечной скорости откачки по всем компонентам газовой среды, включая инертные газы) [7]. Для сравнения следует отметить, что в наземных сверхвысоковакуумных технологических установках с криогенными насосами достигается предельное разрежение не более 10^{-12} мм рт. ст. Предельно достижимый вакуум на входе в одном из лучших в мире гелиевых насосов получен на уровне 10^{-13} мм рт. ст. [8].

Однако при проведении работ по организации «космического» вакуума за защитным экраном на пилотируемых орбитальных объектах необходимо учитывать образующуюся около них собственную внешнюю атмосферу (СВА). СВА представляет собой комплексное динамическое образование, включающее в себя газовую, аэрозольную, и мелкодисперсную фазы, и оказывает негативное влияние на результаты астрофизических, геофизических, материаловедческих и технических исследований и экспериментов. Аэрозольные и дисперсные частицы имеют характерные размеры от 0,1 мм до нескольких милли-

метров и фиксируются, как правило, на расстояниях до 15 м от поверхности объекта [7].

В стационарном состоянии при длительном отсутствии динамических операций (например, при гравитационной стабилизации) давление газовой фазы СВА у поверхности объекта составляет по расчётным оценкам $\sim 10^{-6} - 10^{-5}$ мм рт. ст., что подтверждается данными натурных измерений на орбитальной станции (ОС) «Мир». Некоторые экспериментальные результаты измерения параметров собственной внешней атмосферы ОС «Мир» были получены в эксперименте «Астра-2». На расстояниях порядка 10 м от поверхности ОК давление в СВА не превышает значений порядка 10^{-7} мм рт. ст. При динамических операциях, когда работают двигательные установки, давление в СВА резко возрастает на 2–4 порядка по сравнению с фоновыми условиями, а затем релаксирует к исходному состоянию.

Эти обстоятельства указывают на необходимость применения специальных выносных устройств, обеспечивающих функционирование экспериментальной и измерительной аппаратуры за пределами СВА при проведении материаловедческих, технологических, астрофизических и геофизических исследований в составе РС МКС. В ИЭС им. Е. О. Патона и РКК «Энергия» им. С. П. Королева была разработана специализированная установка «Тюльпан», снабжённая подвижным МЗЭ и выносным устройством для обеспечения обтекания защитного экрана невозмущённым набегающим потоком на высотах орбитального полета.

При проведении технологических исследований используются следующие факторы орбитального полета:

- глубокий вакуум и почти неограниченная производительность откачки компонент рабочего молекулярного пучка, создающие уникальную возможность для сверхбыстрой смены химического состава газовой фазы в зоне роста на поверхности подложки. Данные факторы позволят получить гетеропереходы с идеально резкими профилями;

- отсутствие стенок рабочей камеры, накапливающих и отдающих компоненты молекулярных пучков и атмосферы остаточных газов. Это позволяет устранить влияние упомянутого эффекта «памяти», а также формировать многослойные структуры, содержащие большое число разнородных по составу слоев со строго заданными профилями легирования;

- возможность пространственного удаления элементов технологической оснастки и аналитических средств от зоны эпитаксиального роста и увеличения расстояния от подложки до источников молекулярных пучков. Эти факторы являются определяющими при увеличении количества

независимых источников молекулярных пучков и повышении однородности слоев по площади при росте диаметра подложек;

- возможность использования токсичных летучих жидкостей и газов (гидриды, металлоорганические соединения) в качестве исходных материалов для синтеза пленок без загрязнения окружающей среды. Эти соединения быстро рассеиваются до безопасных концентраций и легко разлагаются на безопасные компоненты под действием солнечного ионизирующего излучения;

- микрогравитация – фактор, который в настоящем проекте в отличие от множества других непосредственно не используется.

3. Наземная отработка эксперимента

В соответствии с планом работ по проекту «Эпитаксия» ГНТП «Фундаментальные космические исследования» в 1996 году были проведены экспериментальные и теоретические исследования процессов формирования гетероэпитаксиальных полупроводниковых пленок германия и арсенида галлия [1–3] методом МЛЭ на кремниевых подложках в наземных условиях. Исследовались изменения структурного совершенства полученных гетеросистем в зависимости от количественных параметров процесса их синтеза. Целью работ первого этапа являлось определение физических факторов, ограничивающих предельно достижимые параметры гетеросистем, синтезируемых в реальных наземных сверхвысоковакуумных установках МЛЭ. Среди таких факторов выявлены два наиболее важных: ограничение по скорости откачки и наличие стенок вакуумной камеры, накапливающих осаждаемые материалы и неконтролируемым образом отдающих их на подложку в процессе получения слоев. Связанная с этим невозможность сочетания в одном вакуумном объеме процессов получения соединений АЗВ5, А2В6 и химических элементов 4-й группы вызывает необходимость переноса подложек из одного ростового модуля в другой. Для проведения таких процессов требуется создание сложных сверхвысоковакуумных установок кластерного типа. Вместе с тем перенос подложки между камерами может приводить к загрязнению атомарно чистой ростовой поверхности и препятствует получению структурно совершенных буферных слоев и пленок арсенида галлия на кремнии. Были проведены эксперименты по определению динамики изменения свойств многослойных структур при улучшении вакуумных условий в технологическом объеме промышленно ориентированной установки типа «Катунь». Установлено, что концентрация фоновой электрически активной примеси в кремниевых пленках при улучшении ваку-

умных условий (суммарное давление остаточных газов 10^{-12} мм рт. ст.) с ростом числа экспериментов выходит на насыщение. Уровень минимальной концентрации примеси составляет $5 \cdot 10^{-13}$ см⁻³. Получены количественные характеристики процесса переноса нелетучих компонент легирующих примесей (бор в кремнии) по поверхностям стенок вакуумной камеры.

Заключение

Дальнейшая работа исполнителей данного проекта направлена на создание и испытание наземных прототипов всех технологических систем установки МЛЭ, предназначенных для выноса в космическое пространство [5]. При этом будет развит многолетний задел в создании трех поколений промышленно ориентированного отечественного оборудования для МЛЭ и базовых технологий эпитаксии элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений. При выполнении проекта будет учитываться опыт в космическом материаловедении и изготовлении установок для выращивания объемных кристаллов в космосе, а

также в создании технологической оснастки, контрольно-измерительной аппаратуры, систем питания и всех бортовых средств автоматизации и телеметрии (ИЭС им. Е. О. Патона и РКК «Энергия» им. С. П. Королева). В отличие от американского проекта, ориентированного в основном на применение в качестве подложек пластин арсенида галлия, в основе российской программы лежит использование более дешевого (в 15 раз) и более легкого (в 2,3 раза) подложечного материала большой площади (пластины кремния диаметром до 200 мм). Получение гетероэпитаксиального слоя арсенида галлия предполагается проводить непосредственно перед синтезом приборных структур [12–15].

В результате реализации проекта планируется создание орбитальной минифабрики по производству высокосовременного альтернативного подложечного материала и многослойных гетеропереходов на основе полупроводниковых соединений типа А4В4, А3В5 и А2В6 на кремниевых пластинах большого диаметра для нужд интегральной опто-, микро- и нанoeлектроники, а также для изготовления солнечных батарей для космического использования.

Список литературы

- [1] Андреев В. М. Концентраторная солнечная фотоэнергетика // Альтернативная энергетика и экология. 2012. Т. 5–6. С. 40–44.
- [2] Alfèrov Zh. I., Andreev V. M., Romyantsev V. D. III-V Heterostructures in Photovoltaics. Concentrator Photovoltaic, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2007, pp. 25–50.
- [3] Алферов Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. Вып. 8. С. 937–948.
- [4] Лаборатория МЛЭ и соединений АЗВ5 [Электронный ресурс]. URL: <http://lib.isp.nsc.ru/16/> (дата обращения: 12.09.2018)
- [5] Валиев К., Орликовский А. Технологии СБИС. Основные тенденции развития // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 1996. № 5–6. С. 3–10.
- [6] Hueser J. E., Brock F. J. Theoretical Analysis of the Density Within an Orbiting Molecular Shield // J. Vac. Sci. Technol., 1976, vol. 13, no. 3, p. 702.
- [7] Ignatiev A. The wake shield facility and space-based thin film science and technology // Earth Space Review, 1995, vol. 2, no. 2, pp. 10–17.
- [8] News Briefs // Compound semiconductors, 1997, no. 1, p. 11.
- [9] Neu G., Teisserire M., Freundlich A., Horton C., Ignatiev A. // Appl. Phys. Lett., 1999, vol. 74, no. 22, pp. 3341–3343.
- [10] Науманн Р. Дж. На пути к абсолютному вакууму // Аэрокосмическая техника. 1987. № 10. С. 129–132.
- [11] Гражулис В. А. Тендер ГКНТ РФ по разработке СВВ СЗМ // Перспективные технологии. 1996. Т. 3. Вып. 21, С. 1–12.
- [12] Устройство для выращивания и обработки материалов в космическом пространстве в условиях сверхвысокого вакуума и способ его эксплуатации (варианты) : пат. 2372259 Рос. Федерация / Блинов В. В., Зворыкин Л. Л., Иванов А. И., Игнатьев А., Машанов В. И., Никифоров А. И., Преображенский В. В., Пчеляков О. П., Соколов Л. В. ; заявл. 12.05.2008 ; опубл. 10.11.2009. Бюл. № 31.
- [13] Блинов В. В., Зворыкин Л. Л., Иванов А. И., Игнатьев А., Машанов В. И., Никифоров А. И., Преображенский В. В., Пчеляков О. П., Соколов Л. В. Устройство для молекулярной лучевой эпитаксии материалов в космическом пространстве и наземный стенд имитатор для испытания устройства // Материалы 18 научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». 2011. С. 393–396.
- [14] Пчеляков О. П., Блинов В. В., Никифоров А. И., Соколов Л. В., Зворыкин Л. Л., Иванов А. И., Тесленко В. В., Чурило И. В., Загребельный А. А. Полупроводниковые вакуумные технологии в космическом пространстве:

история, состояние, перспективы // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2004. № 6. С. 69–76.

- [15] Блинов В. В., Коношенко В. П., Алямовская В. А., Иванов А. И., Игнатьев А., Машанов В. И., Никифоров А. И., Преображенский В. В., Пчеляков О. П., Соколов Л. В. Установка МЛЭ для выращивания полупроводниковых пленок и её интеграция на РС МКС // Материалы 20-й научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». 2013. С. 298–301.

SEMICONDUCTOR VACUUM TECHNOLOGIES IN SPACE: HISTORY, STATUS, PROSPECTS

O. P. Pchelyakov

*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

In this paper we consider the background, history and prospects of the synthesis of multilayer semiconductor compositions from molecular beams in the orbital flight of spacecraft. The advantages of the technological process in a high vacuum formed as a result of the molecular screen effect for the production of new thin-film materials with unique properties are shown. The ground simulator of the space module and the operating model of the molecular screen are described. Discuss the characteristics of conceptual design of generic automated installation of molecular beam epitaxy.

Modern high-performance solar cells (SE) are complex multilayer heterosystems. They consist of three main p-n junctions made of Ge, InGaAs, InGaP and connected in series by tunnel diodes. Since these materials are compatible by the crystal lattice constant, the heterostructures for SE based on them are grown in a single growth process on a germanium p-n transition substrate or on gallium arsenide. Nanotechnology is increasingly being used in this process. The most modern world record for the efficiency of three-pass solar cells with an efficiency of up to 44,5 % at solar radiation intensities of several hundred suns was achieved by Solar Junction, located in the Silicon valley, using molecular epitaxy. The ISP SB RAS is working on the development of high-performance and inexpensive equipment for ultra-high vacuum technology of molecular beam epitaxy of heterostructures for solar cells using space technologies.

Keywords: molecular beam epitaxy, semiconductor nanoheterostructures, solar cells, ultrahigh vacuum, space materials science.

References

- [1] Andreev V. M. *Koncentratornaya solnechnaya fotoehnergetika* [Concentrator solar photo-energy] // Alternative energy and ecology, 2012, vol. 5–6, pp. 40–44. (In Russian)
- [2] Alferov Zh. I., Andreev V. M., Rumyantsev V. D. *III-V Heterostructures in Photovoltaics. Concentrator Photovoltaic*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2007, pp. 25–50.
- [3] Alferov Zh. I., Andreev V. M., Rumyantsev V. D. *Tendencii i perspektivy razvitiya solnechnoj fotoehnergetiki* [Tendencies and prospects for the development of solar photoenergy] // Physics and Technology of Semiconductors, 2004, vol. 38, issue 8, pp. 937–948. (In Russian)
- [4] Laboratory of Molecular Beam Epitaxy. Available at: http://www.isp.nsc.ru/16/index_e.html (accessed: 12.09.2018).
- [5] Valiev K., Orlikovsky A. *Tekhnologii SBIS. Osnovnye tendencii razvitiya* [VLSI Technologies. Major development trends] // Electronics. Science. Technology. Business, 1996, no. 5–6, pp. 3–10. (In Russian)
- [6] Hueser J. E., Brock F. J. Theoretical Analysis of the Density Within an Orbiting Molecular Shield // *J. Vac. Sci. Technol.*, 1976, vol. 13, no. 3, p. 702.
- [7] Ignatiev A. The wake shield facility and space-based thin film science and technology // *Earth Space Review*, 1995, vol. 2, no. 2, pp. 10–17.
- [8] News Briefs // *Compound semiconductors*, 1997, no. 1, p. 11.
- [9] Neu G., Teisserire M., Freundlich A., Horton C., Ignatiev A. // *Appl. Phys. Lett.*, 1999, vol. 74, no. 22, pp. 3341–3343.
- [10] Naumann R. J. *Na puti k absolyutnomu vakuumu* [Towards an absolute vacuum] // *Aerospace Engineering*, 1987, no. 10, pp. 129–132. (In Russian)
- [11] Grazhulis V. A. *Tender GKNT RF po razrabotke SVV SZM* [Tender of the State Committee for Science and Technology of the Russian Federation on the development of UHV SZM] // *Promising technologies*, 1996, vol. 3, issue 21, pp. 1–12. (In Russian)
- [12] Blinov V. V., Zvorykin L. L., Ivanov A. I., Ignatiev A., Mashanov V. I., Nikiforov A. I., Preobrazhensky V. V., Pchelyakov O. P., Sokolov L. V. *Ustrojstvo dlya vyrashchivaniya i obrabotki materialov v kosmicheskom prostranstve v*

- usloviyah sverhvyssokogo vakuuma i sposob ego ehkspluatatsii (varianty)* [Device for growing and processing materials in outer space under ultrahigh vacuum conditions and method of its operation (versions)]. Patent RU 2372259, 2009, bulletin no. 31.
- [13] Blinov V. V., Zvorykin L. L., Ivanov A. I., Ignatiev A., Mashanov V. I., Nikiforov A. I., Preobrazhensky V. V., Pchelyakov O. P., Sokolov L. V. *Ustrojstvo dlya molekulyarnoj luchevoj ehpitatsii materialov v kosmicheskom prostranstve i nazemnyj stend imitator dlya ispytaniya ustrojstva* [A device for molecular beam epitaxy of materials in space and a ground stand simulator for testing devices] // Proceedings of the 18th scientific and technical conference «Vacuum Science and Technology», 2011, pp. 393–396. (In Russian)
- [14] Pchelyakov O. P., Blinov V. V., Nikiforov A. I., Sokolov L. V., Zvorykin L. L., Ivanov A. I., Teslenko V. V., Churilo I. V., Zagrebelny A. A. *Poluprovodnikovye vakuumnye tekhnologii v kosmicheskom prostranstve: istoriya, sostoyanie, perspektivy* [Semiconductor vacuum technologies in outer space: history, status, prospects] // Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies, 2004, no. 6, pp. 69–76. (In Russian)
- [15] Blinov V. V., Konoshenko V. P., Alyamovskaya V. A., Ivanov A. I., Ignatiev A., Mashanov V. I., Nikiforov A. I., Preobrazhensky V. V., Pchelyakov O. P., Sokolov L. V. *Ustanovka MLEH dlya vyrashchivaniya poluprovodnikovyh plenok i eyo integraciya na RS MKS* [Installation of MBE for the cultivation of semiconductor films and its integration on the ISS RS] // Proceedings of the 20th scientific and technical conference «Vacuum Science and Technology», 2013, pp. 298–301. (In Russian)

Сведения об авторах

Афанасьев Николай Иванович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник. Окончил Томский государственный университет. Область научных интересов: фазовые превращения, диффузия, комплексные реакции на мигрирующих границах зерен.

E-mail: af42@yandex.ru

Баскова Анастасия Анатольевна – кандидат технических наук, доцент Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета. Окончила Красноярский государственный технический университет в 1997 году. Область научных интересов: нестабильность вращения Земли, спутниковые системы.

E-mail: abaskova@sfu-kras.ru

Белоцерковский Марат Артемович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией Газотермических методов упрочнения деталей машин. Окончил Донецкий государственный университет в 1972 году. Область научных интересов: материаловедение, инженерия поверхности.

E-mail: mbelotser@gmail.com

Варнаков Сергей Николаевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории Физики магнитных явлений Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет им. М. Ф. Решетнёва в 2001 году. Область научных интересов: нанотехнологии, тонкие пленки, силициды переходных металлов.

E-mail: vsn@iph.krasn.ru

Витязь Петр Александрович – академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, руководитель аппарата НАН Беларуси. Окончил Белорусский государственный технологический университет им. С. М. Кирова в 1960 году. Область научных интересов: порошковая металлургия, композиционные материалы, инженерия поверхности, наноматериалы и нанотехнологии.

E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

Григорьева Татьяна Федоровна – доктор химических наук, ведущий научный сотрудник Института химии твердого тела и механохимии СО РАН. Окончила Новосибирский государственный университет в 1970 году. Область научных интересов: механохимическое взаимодействие в системах металл–металл, металл–углерод, металл–оксид металла, слоистые силикаты–органические соединения; поли-

мерные композиционные радиационно-защитные материалы авиационно-космического назначения.

E-mail: grig@solid.nsc.ru

Дубинчук Алексей Дмитриевич – студент физического факультета Белорусского государственного университета. Область научных интересов: радиационное материаловедение.

E-mail: al.dubinchuk95@gmail.com

Жарков Сергей Михайлович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории Когерентной оптики Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН. Окончил Красноярский государственный университет в 1991 году. Область научных интересов: наноматериалы, структурные фазовые переходы, твердофазные реакции.

E-mail: zharkov@iph.krasn.ru

Жорник Виктор Иванович – доктор технических наук, доцент, заместитель начальника Отделения технологий машиностроения и металлургии, заведующий Лабораторией наноструктурных и сверхтвердых материалов Объединенного института машиностроения НАН Беларуси. Окончил Донской государственный технический университет в 1973 году. Область научных интересов: композиционные материалы, наноматериалы и нанотехнологии, инженерия поверхности, трение и износ в машинах.

E-mail: zhornik@inmash.bas-net.by

Зубов Тимур Александрович – аспирант Военно-инженерного института Сибирского федерального университета. Окончил магистратуру Сибирского федерального университета в 2016 году. Область научных интересов: цифровые системы связи, встраиваемые системы и системы автоматизации.

E-mail: timonische@bk.ru

Ковалева Светлана Анатольевна – старший научный сотрудник Объединенного института машиностроения НАН Беларуси. Окончила Белорусский государственный университет в 1996 году. Область научных интересов: наноматериалы и нанотехнологии, механохимический синтез.

E-mail: sveta_kovaleva@tut.by

Лепаква Ольга Клавдеевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Окончила Томский политехнический университет. Область научных интересов: фазовые превращения и закономерности формирования структуры в процессе СВС.

E-mail: klavdievna.k@yandex.ru

Ляхов Николай Захарович – академик РАН, главный научный сотрудник Института химии твердого тела и механохимии СО РАН. Окончил Новосибирский государственный университет в 1970 году. Область научных интересов: химия твердого тела, радиационная химия, механохимия композитов, химическое материаловедение.

E-mail: lyakhov@solid.nsc.ru

Николаев Никита Сергеевич – аспирант Сибирского федерального университета, инженер Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН. Окончил Сибирский федеральный университет в 2016 году. Область научных интересов: управляемый плазмохимический синтез, наночастицы со структурой ядро-оболочка, плазма кГц-диапазона.

E-mail: nikolaev-ns@iph.krasn.ru

Овчинников Сергей Геннадьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Физики магнитных явлений Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН. Окончил Красноярский государственный университет в 1972 году. Область научных интересов: нанотехнологии, магнитные материалы, сверхпроводимость.

E-mail: sgo@iph.krasn.ru

Сухотин Виталий Владимирович – кандидат технических наук, доцент Военно-инженерного института Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный технический университет в 1999 году. Область научных интересов: фазовые измерения, безопасность спутниковых информационных систем, пеленгация.

E-mail: vsuhotin@sfu-kras.ru

Тарасов Иван Анатольевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории Физики магнитных явлений Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН. Окончил Сибирский федеральный университет в 2010 году. Область научных интересов: нанотехнологии, эллипсометрия, силициды переходных металлов.

E-mail: tia@iph.krasn.ru

Финников Константин Андреевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теплофизики Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный технический университет в 1996 году. Область научных интересов: физика неравновесной низкотемпературной плазмы, методы вычислительной теплофизики, преобразование тепловой энергии.

E-mail: f_const@mail.ru

Цимбал Максим Степанович – начальник сектора АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва». Окончил Томский университет систем управления и радиоэлектроники в 2001 году. Область научных интересов: спутниковые системы связи, проектирование аппаратуры полезной нагрузки для космических аппаратов связи и ретрансляции.

E-mail: tsms@mail.ru

Чеботарев Виктор Евдокимович – доктор технических наук, профессор, ведущий инженер-конструктор АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва». Окончил Харьковский государственный университет в 1963 году. Область научных интересов: астрономия, космонавтика, проектирование космических систем и космических аппаратов, системотехника и системная инженерия.

E-mail: chebotarev@iss-reshetnev.ru

Чурилов Григорий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий Лабораторией аналитических методов исследования вещества Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, профессор базовой кафедры Физики твердого тела и нанотехнологий Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный университет в 1972 году. Область научных интересов: управляемый плазмохимический синтез наноструктур, плазма кГц-диапазона, фуллерены, эндодральные металлофуллерены.

E-mail: churilov@iph.krasn.ru

Яковлев Иван Александрович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории Физики магнитных явлений Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет им. М. Ф. Решетнёва в 2011 году. Область научных интересов: нанотехнологии, ферромагнетизм тонких пленок, молекулярно-лучевая эпитаксия.

E-mail: yia@iph.krasn.ru

Требования к оформлению статей для опубликования в журнале «Космические аппараты и технологии»

Редакция принимает в журнал статьи, соответствующие следующим темам:

- ◀ ракетно-космическая техника
- ◀ новые материалы и технологии в космической технике
- ◀ космическое приборостроение
- ◀ космические услуги
- ◀ инновации и экономика космической отрасли

Статья должна быть подготовлена в формате «Документ Word 97–2003» и направлена на электронную почту редакции isercit@gmail.com.

Вместе со статьей необходимо предоставить акт экспертного заключения с печатью и заключение комиссии экспортного контроля (КЭК) о возможности опубликования или, в случае отсутствия КЭК в организации, письмо за подписью руководителя организации с печатью, что данные сведения не подлежат экспортному контролю.

После принятия материалов автору будет выслан лицензионный договор и акт на право использования редакцией научной статьи при размещении в журнале и электронных базах данных.

Подписанный автором лицензионный договор и акт, а также оригиналы акта экспертного заключения и заключение КЭК должны быть высланы почтой на адрес редакции: 662972, а/я 57, Красноярский край, ЗАТО г. Железногорск. Ассоциация «ТП «НИСС».

При подготовке статьи авторы должны следовать этическим принципам, принятым в научном сообществе и редакцией журнала.

Авторы должны руководствоваться приведенными ниже правилами. Статьи, оформленные без соблюдения этих правил, могут быть возвращены авторам на доработку.

Требования к составу и расположению элементов оформления научной статьи:

- ◀ Индекс УДК располагают отдельной строкой слева.
- ◀ На следующей строке размещается заголовок, который центрируют и набирают строчными буквами (как в предложении, начиная с прописной). Шрифт Times New Roman, 14 кегль, начертание – полужирное. Перенос слов в заголовке недопустим.
- ◀ Под заголовком по центру указываются фамилия и инициалы автора(ов). Шрифт Times New Roman, 14 кегль, по центру, полуторный интервал.
- ◀ Под ФИО автора(ов) по центру указываются: полное название учреждения (место работы), в котором выполнена работа (в именительном падеже), затем город (населённый пункт), область (край), страна. Шрифт Times New Roman, 14 кегль, по центру, полуторный интервал.
- ◀ Аннотация к статье. Объем аннотации: 150–200 слов (равнение на английский вариант аннотации).
- ◀ Ключевые слова (4–7 слов или словосочетаний).
- ◀ Пристатейный библиографический список, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008. Рекомендуется использование не менее 15 источников не старше 5 лет.
- ◀ Следом необходимо привести заголовок, ФИО автора(ов), организацию, аннотацию, ключевые слова и библиографический список на английском языке.
- ◀ В конце документа необходимо привести сведения о каждом авторе (должность и место работы, научные степень и звание, что и когда окончил, область научных интересов, e-mail).

МЕЖДУНАРОДНАЯ IEEE-СИБИРСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ И СВЯЗИ (SIBCON-2019)

Четырнадцатая IEEE-Сибирская конференция, посвящённая достижениям в области разработки и создания систем управления и связи, проводится с 18 по 20 апреля 2019 года в г. Томске, Россия. Конференция SIBCON регулярно организуется Томской группой и студенческим отделением IEEE, компанией National Instruments для того чтобы поддерживать междисциплинарные дискуссии, взаимодействие и сотрудничество через участие в деятельности профессиональных сообществ Института IEEE. Программа конференции предусматривает заседания секций с устными докладами, специальные заседания, краткие курсы и культурную программу.

Основные направления конференции

1. Фундаментальные проблемы теории управления и связи.
2. Робототехника и автоматика.
3. Компьютерные измерительные технологии, сенсоры и системы.

Информационная поддержка конференции

- Журнал «Автоматика и программная инженерия» www.jurnal.nips.ru
- Отраслевой научно-технический журнал «Космические аппараты и технологии» www.journal-niss.ru

Ключевые даты:

- 4 декабря 2018 – последний срок приёма докладов
- 22 января 2019 – уведомление о включении докладов в программу
- 1 апреля 2019 – регистрация участников

Подробная информация о регистрации, инструкции для подготовки статей и научная программа доступны на сайте конференции sibcon.tusur.ru

Архив конференции доступен на сайте ieee.tusur.ru/sibcon

Дорога в космос - университетский центр управления полётом «роем» таких космических аппаратов



www.road-to-space.ru

vk.com/spaceroute

okg2000@mail.ru

kartsan2003@mail.ru