

УДК 629.78:537.311.322

## ЭКСПЕРИМЕНТ «КАРБОН» НА КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ «БИОН-М» № 1

© 2013 В.И. Абрашкин<sup>1</sup>, Ю.Н. Горелов<sup>2</sup>, Л.В.Курганская<sup>2</sup>, А.В. Щербак<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

<sup>2</sup> Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

<sup>3</sup> Самарский государственный университет

Поступила в редакцию 5.11.2013

В статье рассматриваются цели и задачи исследования, основные результаты проведенного на космическом аппарате «БИОН-М» № 1 эксперимента «КАРБОН». Описаны основные этапы разработки эксперимента и научной аппаратуры «КАРБОН». С учетом возможных областей применения в экстремальной микро- и нанoeлектронике и аэрокосмическом приборостроении приведены краткие сведения о свойствах карбида кремния, как уникального полупроводникового материала. Ключевые слова: космический эксперимент, факторы космического пространства, полупроводниковые материалы, карбид кремния, структуры, тонкие плёнки, изолирующие подложки

### ВВЕДЕНИЕ

В рамках Федеральной космической программы 19 апреля 2013 года в 14:00 мск с космодрома Байконур была запущена ракета космического назначения «Союз-2.1а», которая вывела на орбиту научный космический аппарат (КА) «БИОН-М» № 1 разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» [1]. КА «БИОН-М» № 1 был выведен на рабочую околокруговую орбиту со средней высотой полёта 575 км и наклонением 64,9° и после 30-ти суточного полёта на 448 витке его спускаемый аппарат 19 мая 2013 в 07:12 мск совершил посадку. В программу научных экспериментов на борту КА «БИОН-М» № 1 входили исследования по космической биологии и медицине, в том числе радиобиологические исследования. По спектру решаемых задач КА «БИОН-М» № 1 – уникальная орбитальная научно-исследовательская лаборатория, с помощью которой было проведено 79 научных экспериментов, в том числе космический эксперимент (КЭ) «КАРБОН» по исследованию комплексного воздействия факторов космического полёта (открытого космического пространства [2]) на карбидокремниевые структуры. Идея проведения такого КЭ возникла в 2009 году по результатам завершённых исследований [3]. Она была поддержана и, более того, получила активное содействие в её осуществлении и пос-

ледующей реализации в виде КЭ «КАРБОН» как со стороны ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» (разработчик КА «БИОН-М»), так и со стороны ИМБП РАН (разработчик и головной исполнитель научной программы «Биоспутник»). В конечном счёте, совместные усилия учёных и специалистов ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», ИМБП РАН и Самарского государственного университета (СамГУ), соответствующее решение Совета по космосу РАН привели к утверждению Федеральным космическим агентством (Роскосмос) в апреле 2010 г. решения об уточнении состава научной аппаратуры КА «БИОН-М» № 1, в котором было указано, что «для проведения исследований по изучению влияния факторов космического пространства на физико-химические свойства образцов на основе структур карбида кремния ввести дополнительно в состав автономных экспериментов (снаружи СА – спускаемый аппарат КА) эксперимент КАРБОН...». Таким образом, идея о КЭ была переведена в русло практической реализации... Решение задач, связанных с разработкой КЭ и научной аппаратуры (НА) КАРБОН, вначале проводилось на базе научно-образовательного центра «Космические системы дистанционного зондирования» СамГУ, а с середины 2011 года – на этапах изготовления и проведения испытаний (приемо-сдаточных, конструкторско-доводочных и т.д.) НА КАРБОН – в круг её разработчиков и участников КЭ был включён также и ИПУСС РАН.

### 1. О КАРБИДЕ КРЕМНИЯ И SiC-ЭЛЕКТРОНИКЕ. МОТИВАЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Карбид кремния – SiC с момента его открытия Генри Муассаном (Moissan) в виде кристал-

Абрашкин Валерий Иванович, кандидат технических наук, начальник отдела. E-mail: csdb@samtel.ru

Горелов Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе. E-mail: yungor07@mail.ru

Курганская Любовь Викторовна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. E-mail: limbo83@mail.ru

Щербак Андрей Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель. E-mail: anshch@yandex.ru

лов при исследовании метеоритов в каньоне Дьявола в Аризонской пустыне [4] на протяжении уже более ста лет привлекает внимание исследователей своими уникальными свойствами. Карбид кремния является полупроводником, тип проводимости которого зависит от примесей. Благодаря ширине запрещённой зоны ( $>3$  эВ), высокочистые кристаллы SiC прозрачны, при значительном содержании примеси азота они приобретают зелёный цвет. После открытия в 1949 году транзисторного эффекта в  $p$ - $n$ -переходах на кристаллах германия возник промышленный интерес к полупроводникам и в первой половине 50-х годов прошлого века начались поиски полупроводниковых материалов, способных работать при более высоких температурах, чем германий. В связи с этим в последующие годы были проведены обширные исследования SiC и разработки полупроводниковых приборов на его основе, но к началу 70-х годов интерес к карбиду кремния снизился в связи с успехами в развитии кремниевой и арсенид-галлиевой технологий. В настоящее время давно известный полупроводник – SiC, на котором были сделаны важнейшие для физики полупроводников открытия, начинает находить все более широкое применение для производства современных полупроводниковых приборов, в том числе и в особенности в экстремальной микро- и нанoeлектронике. При этом широко используются такие его физические свойства, как твёрдость (9,2–9,3 по шкале Мосса; SiC уступает только алмазу и нитриду бора) и термостойкость (диапазон рабочих температур до 600...1000°C). Практически по всем основным параметрам карбид кремния превосходит классические полупроводниковые материалы – кремний и арсенид галлия (табл. 1) [4, 5].

В [4] отмечаются следующие достоинства SiC, определяющие перспективы его широкого промышленного применения. Во-первых, это большая, по сравнению с Si и GaAs, ширина за-

прещённой зоны, что приводит к большему диапазону рабочих температур. Во-вторых, по сравнению с кремнием почти на порядок большее значение поля пробоя SiC, а также при одном и том же значении напряжения пробоя уровень легирования SiC-диода может быть на два порядка выше, чем кремниевый, что приводит, в конечном счете, к высокой радиационной стойкости SiC-приборов. В-третьих, высокая теплопроводность в сочетании с высокими допустимыми рабочими температурами (что в значительной степени снижает проблемы теплоотвода) и большими скоростями насыщения носителей обеспечивает хорошие перспективы SiC-приборам при использовании в силовой электронике. В-четвёртых, высокая температура Дебая, которую можно рассматривать как параметр, характеризующий термическую стабильность полупроводника. В-пятых, это возможности изготовления из того же материала, что и полупроводниковая структура, подложек большого размера и получения SiC  $n$ - и  $p$ -типов проводимости, а также наличие собственного окисла ( $\text{SiO}_2$ ), что позволит изготавливать на основе SiC любые типы полупроводниковых приборов. Особое значение перечисленные достоинства SiC имеют для экстремальной микро- и нанoeлектроники, для аэрокосмического приборостроения и, в особенности, при создании элементной базы и приборов, способных работать в условиях открытого космического пространства. В связи с этим отметим, что это актуально для современных КА дистанционного зондирования Земли, оснащаемых оптико-электронными телескопическими комплексами [1]. Одним из сложных полупроводниковых приборов в такой бортовой аппаратуре являются ПЗС-матрицы [6], характеристики которых существенно влияют на показатели эффективности применения КА такого класса. Кроме того, в области аэрокосмического приборостроения актуальны и представляют практический интерес планарные технологии

**Таблица 1.** Параметры некоторых полупроводниковых материалов [4]

| Материал | Ширина запрещенной зоны, эВ | Напряжение пробоя, мВ/см | Подвижность электронов, $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ | Дрейфовая скорость электронов при $V_{\text{нас}}$ , см/с | Теплопроводность, Вт/м/К |
|----------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------|
| Si       | 1,12                        | 0,6                      | 1,1                                                         | $1 \cdot 10^7$                                            | 150                      |
| GaAs     | 1,42                        | 0,6                      | 6,0                                                         | $8 \cdot 10^8$                                            | 50                       |
| GaN      | 3,39                        | 3,3                      | 1,0                                                         | $2,5 \cdot 10^7$                                          | 130                      |
| 3C-SiC   | 2,20                        | 2,0                      | 750                                                         | $2,5 \cdot 10^7$                                          | 500                      |
| 4H-SiC   | 3,26                        | 3,0                      | 800                                                         | $2 \cdot 10^7$                                            | 490                      |
| 6H-SiC   | 3,00                        | 3,0                      | 370                                                         | $2 \cdot 10^7$                                            | 490                      |
| Алмаз    | 5,50                        | 6,0                      | 2200                                                        | $2,7 \cdot 10^7$                                          | 2000                     |

на основе карбидокремниевых структур (SiC) на изолирующих подложках с целью разработки широкого спектра полупроводниковых датчиков и приборов для экстремальной микро- и наноэлектроники. Несмотря на то, что свойства SiC (и его многочисленных политипов, а их более 200) и возможные области его применения достаточно хорошо изучены [4], тем не менее технологические основы его практического применения в аэрокосмическом приборостроении практически отсутствуют, в том числе не изучено влияние на карбидокремниевые структуры (нано-плёнки толщиной от 200...500 нм до 1...2 мкм) экстремальных факторов [5], в том числе факторов космического пространства (вакуум, радиация, температурные перепады и т.п. [2]), что и мотивировало подготовку и проведение соответствующего КЭ [7].

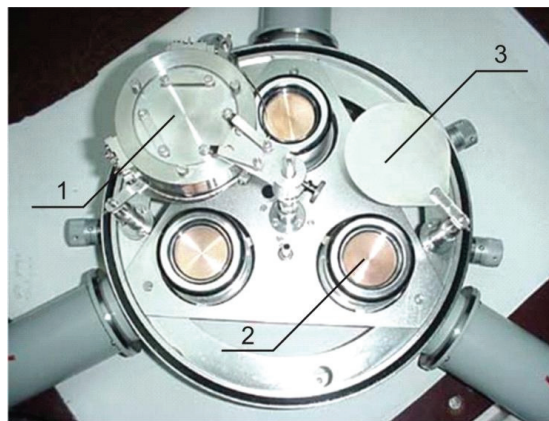
## 2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА. НАУЧНАЯ АППАРАТУРА КАРБОН

В техническом задании на разработку научной аппаратуры КАРБОН основная цель и задачи КЭ заключаются в исследовании комплексного воздействия факторов космического пространства (ФКП) на стойкость карбидокремниевых структур и чувствительных элементов на их основе при их экспонировании в условиях открытого космического пространства, в проведении соответствующих лабораторных исследований. Исходя из этого, практическая реализация КЭ потребовала решения следующих инженерно-технических задач: во-первых, получение образцов структур SiC на изолирующих подложках (далее – Элементы Карбон); во-вторых, разработка оборудования для измерения параметров и характеристик Элементов Карбон, и, в-третьих, разработка научной аппаратуры КАРБОН для проведения КЭ, а также изготовление и проведение ее необходимых испытаний.

### 2.1. Технология получения образцов SiC-структур

Карбидокремниевые структуры в виде тонких плёнок кубического карбида кремния (3C-SiC) на кремниевых и изолирующих подложках получались методом магнетронного напыления [8]. С этой целью применялся вакуумный универсальный пост (ВУП-5М) с приставкой магнетронного напыления (рис. 1) и высокочастотным генератором.

Напыление *n*-SiC производилось на подложки из следующих материалов: а) *p*-Si (кремний *p*-типа); б) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (поликор); в) SiO<sub>2</sub> (ситалл). В



**Рис. 1.** Магнетронная система:

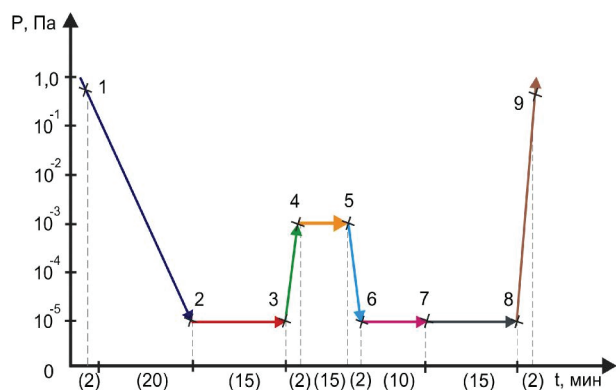
1 – подложкодержатель с нагревом образцов, 2 – магнетронно-распылительная система, 3 – заслонка

процессе формирования тонких плёнок карбида кремния на подложках контролировались следующие технологические управляющие параметры: а) температура подложечного материала; б) давление в рабочей камере; в) величина разрядного тока; г) время напыления. Кроме того, одним из основных контролируемых параметров являлось структурное состояние поверхности подложек, так как именно оно в значительной степени влияет на структуру и физические свойства получаемых плёнок SiC. В особенности это проявляется при формировании гетеропереходов для структур карбид кремния на кремнии, поскольку в этом случае металлургическая граница раздела между подложкой и выращенным слоем плёнки совпадает с электрическим переходом. Поэтому к используемым в качестве подложек материалам предъявлялись повышенные требования к совершенству кристаллической структуры их поверхности и к геометрическому совершенству, а также к чистоте поверхности поверхностного слоя. Для их достижения проводились следующие основные операции:

- лазерное скрайбирование подложек (на отдельные образцы – Элементы Карбон);
- обезжиривание пластин кипячением в толуоле;
- промывка в спирте, а затем в деионизованной воде;
- химическое травление в смеси (HF : CH<sub>3</sub>COOH : HNO<sub>3</sub> = 3 : 3 : 5);
- промывка в деионизованной воде и последующая сушка.

После указанной подготовки подложки крепились на подложкодержатель в рабочем объеме магнетронно-распылительной системы (рис. 1).

Процесс напыления полупроводникового SiC проводился в соответствии с циклограммой, показанной на рис. 2 [3] (для одного из режимов



**Рис. 2.** Временная циклограмма технологического процесса формирования слоя карбида кремния на изолирующей подложке

напыления), где 1 – загрузка подложки (2 мин.), 1 → 2 – откачка рабочего объема камеры до давления  $10^{-5}$  Па (20 мин.), 2 → 3 – нагрев подложки до 500...750 °C (15 мин.), 3 → 4 – напуск рабочего газа – аргона (2 мин.), 4 → 5 – выход на режим распыления (разряд) и процесс напыления (до 15 мин.), 5 → 6 – откачка рабочего газа (2 мин.), 6 → 7 – вакуумный отжиг подложки ( $\approx 10$  мин.), 7 → 8 – процесс охлаждения подложки (15 мин.), 8 → 9 – напуск воздуха и завершающие операции ( $\approx 2$  мин.).

Основные параметры оптимального режима роста пленок полупроводникового карбида кремния требуемого качества следующие: а) нагрев подложки ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$ ) при 500...750 °C до 12...15 мин; б) время напыления до 8...10 мин; в) вакуумный отжиг полученных структур до 7...10 мин. Толщина плёнок карбида кремния при этом составляла 0,2 ...2,3 ( $\pm 0,1$ ) мкм.

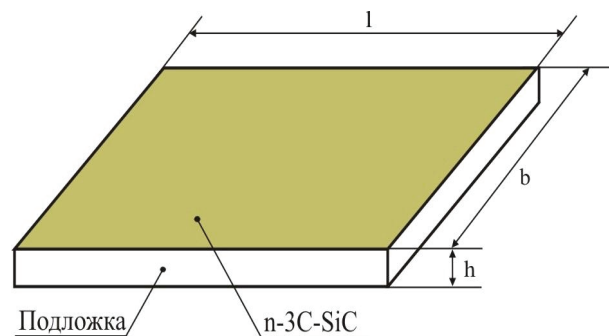
Морфология поверхности и рельеф получаемых плёнок контролировались с помощью изображений растрового электронного микроскопа и сканирующего зондового микроскопа. Проведённые исследования морфологии поверхности получаемых плёнок карбида кремния показали, что плёнки имеют плотную (сплошную) структуру, а их дефекты обусловлены в основном неконтролируемыми загрязнениями поверхности подложки, которые могут быть удалены только путём проведения соответствующей обработки поверхности (например, методом плазмохимического травления).

Измерения электрофизических характеристик полученных плёнок SiC, проведённые с помощью эффекта Холла [3], показали следующее: удельное сопротивление  $\approx 0,6$  Ом·см; значение подвижности носителей заряда  $\approx 410$  см<sup>2</sup>/В·с; концентрация  $\approx 2,7 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

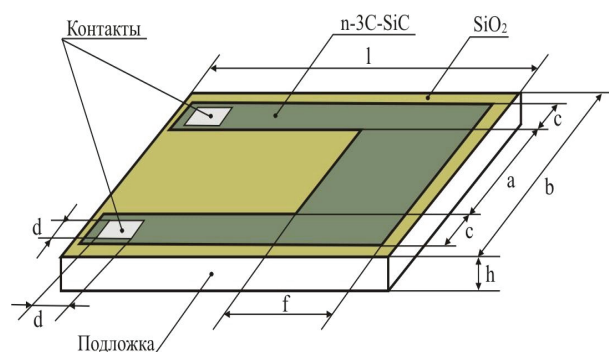
Рентгеновский энергодисперсионный микроанализ полученных пленок карбида кремния показал высокую стабильность химического состава

ва в различных областях поверхности одного и того же образца и низкий разброс состава для различных образцов.

Полученные структуры ( $n\text{-SiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $n\text{-SiC}/\text{SiO}_2$ ,  $n\text{-SiC}/p\text{-Si}$ ) фрагментировались методом скрайбирования с помощью режущего алмазного диска и последующей ломкой. После получения образцов с требуемыми размерами на часть из них были нанесены омические контакты из никеля методом магнетронного напыления с использованием специальной маски для контактов. В результате были получены следующие комплекты образцов Элементов Карбон: а) Элементы Карбон-1 (рис. 3); б) Элементы Карбон-2 (рис. 4). Габаритные размеры Элементов Карбон-1: длина ( $l$ ) – 7-0,05 мм; ширина ( $b$ ) – 7-0,05 мм; толщина ( $h$ ) – 0,5-0,04 мм, соответственно, для Элементов Карбон-2: длина ( $l$ ) – 10-0,05 мм; ширина ( $b$ ) – 5-0,05 мм; толщина ( $h$ ) – 0,38-0,04 мм; преобразующая часть ( $a \times f$ ) – не более  $3 \times 2$  мм; ширина контактной полоски ( $c$ ) – не более 1 мм; размеры омических контактов ( $d \times d$ ) –  $0,3 \times 0,3$  мм<sup>2</sup>.



**Рис. 3.** Элементы Карбон-1



**Рис. 4.** Элементы Карбон-2

## 2.2. Научная аппаратура КАРБОН

В состав научной аппаратуры КАРБОН входит четыре Сборки КАРБОН, общий вид которых показан на рис. 5 и 6. Элементы Карбон-1 предназначены для снаряжения Сборки КАРБОН-1 и 1А (рис. 5), Элементы Карбон-2 – для

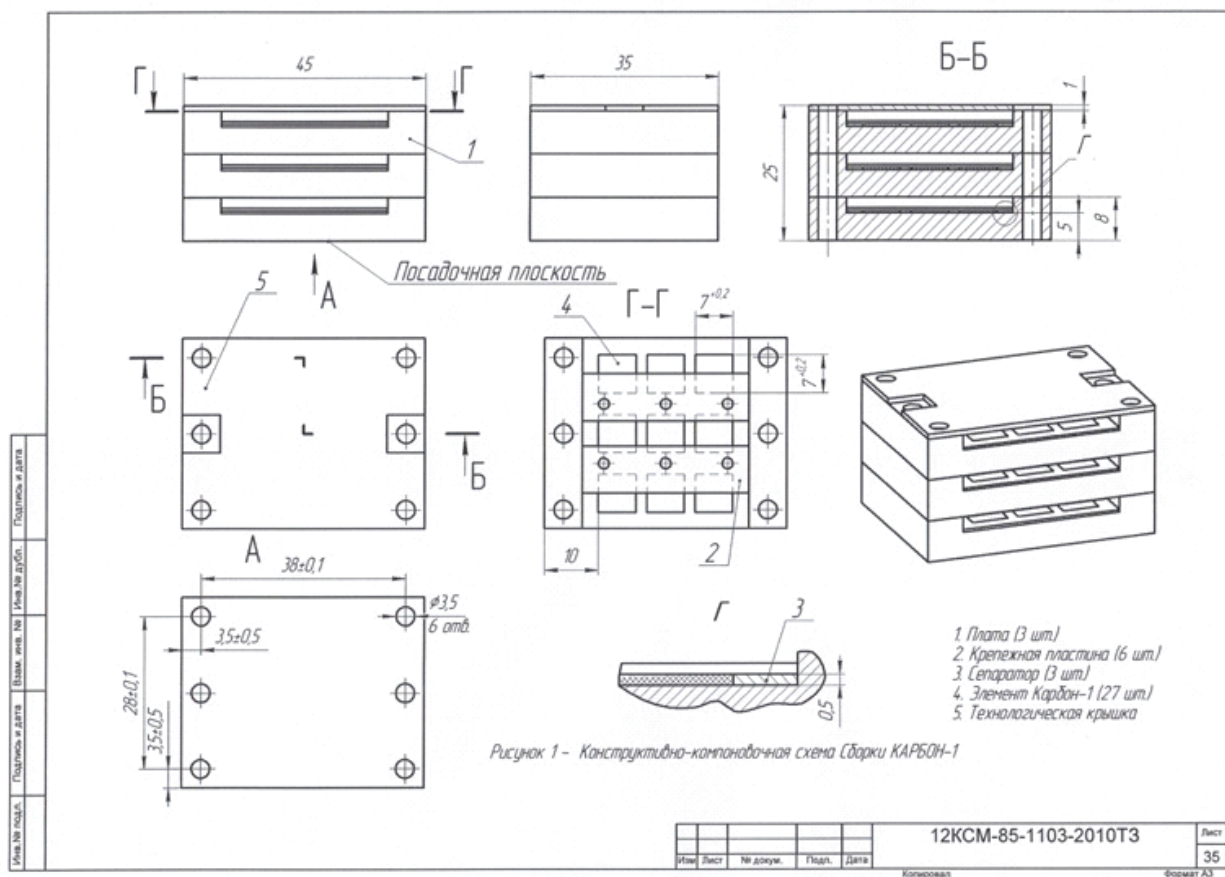


Рис. 5. Конструктивно-компоновочная схема Сборок КАРБОН-1 (1А)

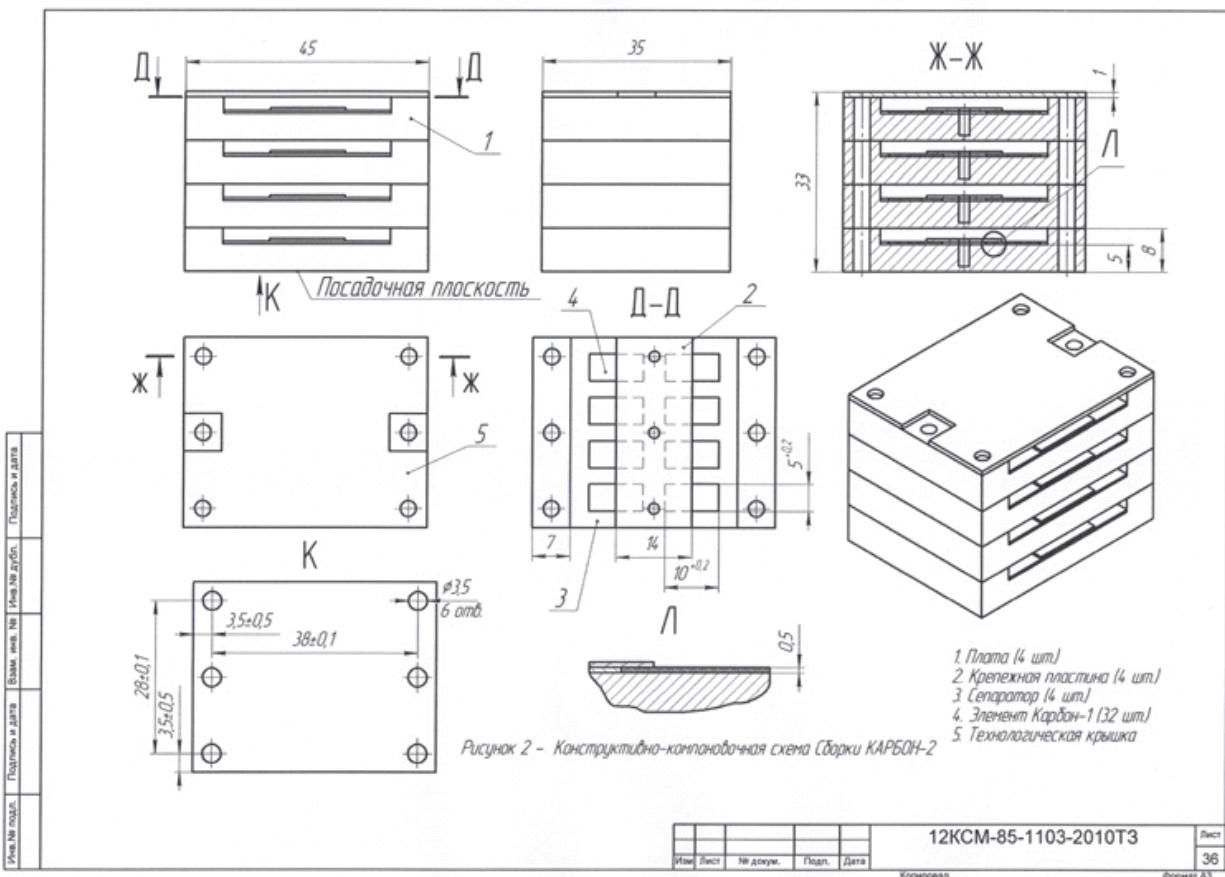


Рис. 6. Конструктивно-компоновочная схема Сборок КАРБОН-2 (2А)

снаряжения Сборок КАРБОН-2 и 2А (рис. 6). Сборки КАРБОН монтируются на плату полезной нагрузки, которая в свою очередь при подготовке КА «БИОН-М» № 1 на техническом комплексе космодрома Байконур устанавливается в контейнер научной аппаратуры на внешней поверхности КА (на спускаемом аппарате). Сборки КАРБОН-1 и 1А снаряжаются Элементами Карбон-1 в количестве 64 шт., а Сборки КАРБОН 2 и 2А – элементами Карбон-2 также в количестве 64 шт.

### 3. ПОДГОТОВКА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ, ПРОВЕДЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА КАРБОН, ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РАЗВИТИЯ

После изготовления научной аппаратуры КАРБОН (с привлечением производственных подразделений ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»), снаряжения её соответствующими Элементами Карбон, а также после проведения испытаний в ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» и ИМБП РАН научная аппаратура КАРБОН была одной из первых подготовлена в полном объеме к проведению

летного КЭ. Установка научной аппаратуры КАРБОН на КА «БИОН-М» № 1 проводилась непосредственно на техническом комплексе (площадка № 112) космодрома Байконур (рис. 7, 8). После контрольного осмотра и монтажа Сборок КАРБОН на плату полезной нагрузки последняя была установлена в контейнер научной аппаратуры КА «БИОН-М» № 1 (рис. 9, 10). Завершающая операция в подготовке научной аппаратуры КАРБОН – её контрольный осмотр на борту КА (рис. 11). После успешного запуска КА «БИОН-М» № 1 19 апреля 2013 года (рис. 12) и завершения его полёта 19 мая научная аппаратура КАРБОН была демонтирована и доставлена в г. Самару для изучения экспонировавшихся в течение 30-ти суток в условиях открытого космического пространства Элементов Карбон – карбидокремниевых структур на изолирующих подложках.

Проведенные исследования до- и послеполетных свойств и характеристик образцов карбидокремниевых структур (Элементов Карбон) в виде тонких пленок (от 500 нм до 2 мкм) карбида кремния на изолирующих подложках ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , p-Si) показали, что указанные структуры, полученные методом магнетронного распыления, об-



**Рис. 7.** Монтаж Сборок КАРБОН на плату полезной нагрузки



**Рис. 8.** Монтаж Сборок КАРБОН завершен. Слева направо: А.И. Пахомов (ИМБП РАН), Л.В. Курганская и Ю.Н. Горелов (ИПУСС РАН)



**Рис. 9.** Установка платы полезной нагрузки с научной аппаратурой КАРБОН в контейнер научной аппаратуры КА «БИОН-М» № 1



**Рис. 10.** Научная аппаратура КАРБОН



**Рис. 11.** Контрольный осмотр научной аппаратуры КАРБОН на КА «БИОН-М» № 1

ладают высокой стойкостью к воздействию факторов космического пространства. Изменений в морфологии поверхностей пленок, в химическом составе и электрофизических характеристиках не выявлено, а также не обнаружено изменений в количестве и характере имевшихся дефектов поверхностей. Таким образом, основной результат КЭ КАРБОН состоит в том, что свойства такого уникального полупроводникового материала как карбид кремния SiC в виде пленок на изолирующих подложках при воздействии факторов космического пространства сохраняются практически без заметных изменений. В результате подготовки и проведения КЭ КАРБОН были решены в полном объеме следующие научно-технические задачи:

- 1) разработаны технологические основы создания карбидокремниевых структур на изолирующих подложках с заданными параметрами;
- 2) изготовлены летные образцы Элементов Карбон и проведены до- и послеполетные исследования их основных параметров и электрофизических характеристик;
- 3) разработана научная аппаратура для проведения космического эксперимента КАРБОН на КА «БИОН-М» № 1.

Кроме того, с использованием контрольных и летных образцов Элементов Карбон были разработаны опытные образцы датчиков СВЧ-мощности [9] и для них затем были проведены исследования, которых подтвердили высокие метрологические характеристики (точность, линейность и стабильность в широком диапазоне температур) как для контрольных, так и для летных образцов Элементов Карбон.

Безусловно, результаты проведенного космического эксперимента КАРБОН являются только самым первым шагом по изучению новых полупроводниковых материалов для создания элементной базы экстремальной микро- и наноэлектроники и



**Рис. 12.** После успешного запуска КА «БИОН-М» № 1:

Разработчик КЭ и НА КАРБОН Л.В. Курганская;  
Генеральный директор ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»  
А.Н. Кирилин

аэрокосмического приборостроения. Дальнейшее и более полное изучение влияния факторов космического пространства на свойства карбидокремниевых и аналогичных им структур из других перспективных полупроводниковых материалов возможно при продолжении экспериментов с экспонированием соответствующих образцов в условиях космического полета, но с гораздо большей длительностью и на более высоких орбитах. При этом представляет практический интерес изучение не только образцов таких структур, но и различных датчиков и приборов на их основе.

Следует ещё отметить, что успешное проведение космического эксперимента КАРБОН во многом обусловлено творческой коллаборацией ученых и специалистов ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», ИПУСС РАН, ИМБП РАН и СамГУ. Это также позволило опыт, полученный при подготовке и проведении этого эксперимента, использовать в постановках новых «задач на вырост» в дальнейшем развитии эксперимента КАРБОН, в новых разработках научной аппаратуры для КА «ФОТОН-М» № 4 и «БИОН-М» № 2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты разработки научной аппаратуры и проведения космического эксперимента «КАРБОН» позволяют сформулировать следующие направления дальнейших исследований.

Во-первых, для более полного изучения влияния факторов космического пространства на карбидокремниевые структуры и на аналогичные им структуры из других перспективных полупроводниковых материалов необходимо продолжить эксперименты с экспонированием соответствующих образцов в условиях космического полёта, но с большей длительностью и на более высоких орбитах.

Во-вторых, определенным развитием эксперимента «КАРБОН» являются космические эксперименты не только с элементами-«мишенями» типа Элементов Карбон для изучаемых полупроводниковых структур, но и с изделиями на их основе.

В конечном счете, проведение космических экспериментов с полупроводниковыми структурами, которые аналогичны эксперименту «КАРБОН» и являются его дальнейшим развитием, – необходимый этап в создании новых типов датчиков физических величин, полупроводниковых приборов и устройств в классе “SPACE”, предназначенных для ракетно-космической техники и аэрокосмического приборостроения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирилин А.Н., Анишаков Г.П., Ахметов Р.Н., Сторож А.Д. Космическое аппаратостроение: научно-техни-

- ческие исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» [под ред. д.т.н. А.Н. Кирилина]. Самара: АГНИ, 2011. 280 с.
2. Панасюк М.И. Модель космоса: Научно-информационное издание в 2-х т. Т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007. 1144 с.
3. Курганская Л.В. Свойства гетероструктур карбида кремния на кремнии и изоляторе в области сверхвысоких частот. Автореферат дис. ... канд. физ.-мат. наук. Самара, 2009. 19 с.
4. Лебедев А., Сбруев С. SiC-электроника: прошлое, настоящее, будущее // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2006. №5. С.28-41.
5. Карбид кремния: технология, свойства, применение [под ред. А.Е. Беляева, Р.В. Конаковой]. Харьков: ИСМА. 2010. 532 с.
6. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 234 с.
7. Абрашкин В.И., Горелов Ю.Н., Курганская Л.В., Щербак А.В. Об экспериментальных исследованиях влияния факторов космического пространства на тонкопленочные структуры карбида кремния // Обзорные приклад. и промышл. математики (Тезисы доклада на XII Всеросс. Симпозиуме по прикладной и промышленной математике; г.Казань, 1 – 8 мая 2011 г.). 2011. Т.18. В.2. С.241-242.
8. Воронов В.К., Подоплелов А.В., Сагдеев Р.З. Физика на переломе тысячелетий: Физические основы нанотехнологий. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. 432 с.
9. Курганская Л.В., Щербак А.В. Разработка измерителей высоких уровней СВЧ-мощности на основе структур карбид кремния на изоляторе для аэрокосмических систем // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т.13. № 6. С.30-36.

#### THE EXPERIMENT “CARBON” ON THE SPACECRAFT “BION-M” № 1

© 2013 V.I. Abrashkin<sup>1</sup>, Y.N. Gorelov<sup>2</sup>, L.V. Kurganskaya<sup>2</sup>, A.V. Shcherbak<sup>3</sup>

<sup>1</sup> State Research and Production Space-Rocket Center “TsSKB-Progress”, Samara

<sup>2</sup> Institute for the Control of Complex Systems of RAS, Samara

<sup>3</sup> Samara State University

The article discusses the purposes and research problems, main results for the space experiment “CARBON” made on the spacecraft “BION-M” # 1. It describes the main development stages of the experiment and the scientific equipment “CARBON”. With regard to the possible field of application in extreme micro - and nanoelectronics and aerospace instrument-making provides a summary of information about properties of silicon carbide as a unique semiconductor material.

Key words: space experiment, space factors, semiconductor materials, silicon carbide, structures, the thin films, isolating substrates

Valeriy Abrashkin, Candidate of Technics, Head of Department.  
E-mail: csdb@samtel.ru

Yury Gorelov, Doctor of Technics, Professor, Deputy Director for Science. E-mail: yungor07@mail.ru

Lubov Kurganskaya, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Research Fellow. E-mail: limbo83@mail.ru

Andrey Shcherbak, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Lecturer. E-mail: anshch@yandex.ru