

## ВЫРАЩИВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ В ОТКРЫТОМ КОСМОСЕ

**В. В. Блинов<sup>1</sup>, В. М. Владимиров<sup>2</sup>, Н. А. Кушнарв<sup>3</sup>,  
А. И. Никифоров<sup>1</sup>, Д. Б. Придачин<sup>1</sup>, Д. О. Пчеляков<sup>1</sup>,  
О. П. Пчеляков<sup>1</sup> ✉, В. А. Скорodelов<sup>4</sup>, Л. В. Соколов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников имени А. В. Ржанова СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «НПФ Электрон», г. Красноярск, Российская Федерация

<sup>3</sup> ОАО «Центральный научно-исследовательский институт инфокоммуникационных технологий  
и проблем безопасности «НИКА», г. Люберцы, Московская область, Российская Федерация

<sup>4</sup> АО «НПО «Молния», г. Москва, Российская Федерация

*Практическая космическая деятельность страны в околоземном пространстве и в дальнем космосе развивается уже в течение более пятидесяти лет. За это время было решено много новых научно-технических задач, разработаны и освоены новейшие технологии. Настоящая статья посвящена описанию предпосылок к проведению эксперимента по выращиванию полупроводниковых структур для высокоэффективных солнечных батарей в условиях орбитального полета международной космической станции. 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 в космосе. Приводится обоснование экономической эффективности космической технологии, основанное на отсутствии необходимости применения дорогостоящих сверхвысоковакуумных средств откачки, криогенной техники и вакуумных объемов, содержащих большое количество нержавеющей стали. Проанализирован опыт трех орбитальных полетов американских космических кораблей «Шаттл», подтверждающий экономическую обоснованность проектов, связанных с получением полупроводниковых гетероструктур в условиях космического полета.*

*Ключевые слова: космическое материаловедение, молекулярно-лучевая эпитаксия, молекулярный экран, орбитальный полет, сверхвысокий вакуум.*

### Введение

Современные высокоэффективные солнечные элементы (СЭ) 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 СЭ на их основе выращиваются в едином ростовом процессе на подложках на основе германия или арсенида гал-

лия [1–3]. Важно отметить, что солнечный элемент по конструкции является самым простым электронным прибором. Для его изготовления не нужны сложные методы фотолитографии, и можно ограничиться последовательным нанесением полупроводниковых и металлических слоев.

В 1987 году во Франкфурте-на-Одере прошла одна из конференций стран бывшего СЭВ по молекулярной эпитаксии. Делегацию ИФП СО РАН возглавлял профессор Сергей Иванович Стенин. В кулуарах обсуждалась идея переноса установки молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в космос. Тогда уже было известно, что с помощью так называемого «молекулярного экрана» в космосе можно получить сверхвысокий вакуум. И все же идея

✉ pchome@mail.ru

МЛЭ в космосе обсуждалась во Франкфурте скорее как фантастическая, чем технологическая.

Через два года после этой конференции, как теперь становится ясно, в США идея выноса вакуумных технологий в космос стала переходить в практическую плоскость. В Университете Хьюстона под руководством профессора А. Игнатъева уже были начаты космические эксперименты, подтверждающие своими результатами справедливость наших выводов о перспективности проведения процесса МЛЭ в космосе. Всего было реализовано три миссии американских Шаттлов. Эти работы были направлены на преодоление принципиальных ограничений традиционных вакуумных технологических процессов, проводящихся в наземных условиях. Для этого использовались физические факторы открытого космического пространства, приводящие к почти мгновенной откачке всех компонентов газовой среды, включая инертные газы. Особенно яркий эффект дает использование того самого «молекулярного экрана», с помощью которого, как показывают расчеты и результаты первых экспериментов, возможно получение такого разряжения газовой среды, которое не может быть в принципе достигнуто в наземных условиях.

Интересен вопрос: когда была высказана впервые и кому первому принадлежит идея получения вакуума в кильватерной области летящего с большой скоростью предмета? Наверняка не в 1970 году, и не американцы были здесь первыми. Откроем фрагмент книги ныне покойного профессора Михаила Васильевича Терентьева «Об истории и развитии понятия физического вакуума». Он вносит неожиданную ясность. Оказывается, в 4-м веке до нашей эры Аристотель примерно так выразил данную идею: «Пустота (вакуум) – это есть пространство, которое образуется в следе камня выпущенного из пращи, правда, оно моментально исчезает, поскольку сюда устремляются частицы из окружающего пространства ...». Аристотелю надо было только закончить эту мысль так: «... и если мы разгоним камень до скорости, сравнимой со скоростью всех частиц окружающей среды, то за ним в полете всегда будет существовать абсолютно пустое пространство», и тогда можно было бы считать его автором нового способа получения сверхглубокого вакуума!

Вся история вакуумной техники и технологий с ней связанных состоит из непрерывной и тяжелой борьбы за сверхвысокий и чистый космический вакуум в тесных и жестких рамках наземных условий. Каждый новый успех в этой области достигнут человеком вопреки земной природе, которая так «боится» пустоты. Стоимость современных установок для получения и использования сверхвысокого вакуума достигает величин в миллионы долларов. А эксплуатация этих систем обходится тем дороже, чем более глубоким является полу-

чаемый вакуум, чем больше энергии, жидких гелия и азота расходуется для его получения. Наша страна после развала собственной вакуумной промышленности покупает такие установки только за рубежом. При покупке каждой установки обычно составляется бизнес-план, и покупатель рассчитывает получить положительный экономический эффект. Средств, затраченных на приобретение только нескольких таких установок, хватило бы на реализацию всего проекта «Экран».

В ИФП СО РАН в сотрудничестве с Физико-техническим институтом им. А. Ф. Иоффе, отраслевых НИИ «Научный центр», ЦНИИмаш, РКК «Энергия», а на начальной стадии с ИЯФ СО РАН, предприятиями промышленности АО «НПО «Молния» и АНТК «Антонов», проводились работы по созданию высокопроизводительной, надежной и недорогой аппаратуры для сверхвысоковакуумной технологии МЛЭ гетероструктур солнечных элементов с применением космических технологий [4–6]. Совместно с ними был подготовлен новый проект и научно-техническое обоснование для проведения экспериментов по эпитаксии полупроводниковых соединений на кремниевых подложках в условиях космического пространства за молекулярным экраном. В течение трех десятилетий разрабатываются методы, технологии и аппаратура для получения многослойных гетероструктур различного назначения. Для их использования в условиях космического пространства крайне желательно заменить дорогие и тяжелые подложки Ge и GaAs на дешевые и легкие кремниевые пластины. Создание высокоэффективных приборов микро-, нано- и фотоэлектроники на основе полупроводниковых наногетероструктур, которые состоят из соединений III-V, выращенных на дешевых и более прочных Si подложках, является одной из приоритетных задач современного полупроводникового материаловедения. Результаты многолетней работы по практической реализации технологии получения гетероструктур в условиях орбитального полета космических аппаратов показали, что наиболее успешным представляется реализация такой технологии с использованием МЛЭ и эффекта молекулярного экрана [4–10].

## 1. Эффект молекулярного экрана

Идея использования молекулярного экрана для получения сверхвысокого вакуума в космосе на низких орбитах принадлежит американским ученым. Первым эту идею в 1970 году выдвинул Рональд Костоф [7], но на нее не обратили должного внимания. В 1976 году Л. Мелфи с соавторами без ссылок на Р. Костофа провел теоретический анализ состояния газовой среды вокруг летящего в пространстве экрана и сформулировал концепцию орбитальной лаборатории со сверхразрежен-

ной средой. Эта работа проводилась при поддержке НАСА [8; 9]. Расчеты и первые эксперименты в аэродинамической трубе показали, что если на высоте 200–400 км с первой космической скоростью будет двигаться экран (полированный диск из нержавеющей стали), то в его кильватере образуется конусный след, практически лишенный вещества. С помощью молекулярного экрана можно получить такое разрежение, что появление одного атома кислорода (кислород – основной компонент газовой среды на высотах орбитальных полетов космических станций) на площадке в один квадратный дециметр придется ожидать миллион лет. Давление атмосферы за экраном будет определяться He и H<sub>2</sub>, источником которых является Солнце, а также веществом, испаряющимся с поверхности самого экрана. Для сравнения, в наземных сверхвысоковакуумных технологических установках с криогенными насосами достигается предельное разрежение в сотни и тысячи раз хуже, чем было практически получено в первых американских космических экспериментах с молекулярным экраном. На высотах орбитального полета при поперечном обтекании защитного экрана невозмущенным набегающим потоком в аэродинамическом следе за ним существует стабильная естественная область глубокого вакуума. В этой области «космического» вакуума достигаются уровни разрежения порядка 10<sup>-15</sup> – 10<sup>-10</sup> мм рт. ст. и ниже при почти полном отсутствии кислорода и углеродсодержащих компонент. При проведении оценок достигаемых уровней разрежения предполагалось, что с рабочей («теневой») поверхности защитного экрана предварительно удалены сорбированные примеси, и скорости собственного газовыделения в зону следа соответствуют парциальному давлению порядка 10<sup>-15</sup> мм рт. ст. Этот уровень газовыделения характерен для обезгаженных металлов, применяемых в сверхвысоковакуумной технике. Результаты оценок также показали, что из окружающей среды в зону разрежения за защитным экраном преимущественно попадают «быстрые» молекулы He и H<sub>2</sub>, скорости теплового движения которых существенно превышают орбитальную скорость полета, и их парциальные давления на высотах H ≈ 250–500 км на пять-шесть порядков ниже по сравнению с указанным выше парциальным давлением молекул газовыделения.

## 2. Опыт американских экспериментов по эпитаксии полупроводниковых гетероструктур в условиях космического пространства

В Университете Хьюстона под руководством профессора А. Игнатъева были начаты космические эксперименты, подтверждающие своими ре-

зультатами справедливость наших выводов и перспективность проведения процесса МЛЭ в космосе. Большая установка МЛЭ весом около 4 тонн трижды была выведена в космическое пространство с помощью кораблей типа «Шаттл». Эти работы были направлены на преодоление принципиальных ограничений традиционных вакуумных технологических процессов, проводящихся в наземных условиях [8]. Для этого использовались физические факторы открытого космического пространства, приводящие к почти мгновенной откачке всех компонентов газовой среды, включая инертные газы. Особенно яркий эффект дало использование того самого «молекулярного экрана», с помощью которого, как показывают расчеты и результаты первых экспериментов, возможно получение такого разрежения газовой среды, которое не может быть в принципе достигнуто в наземных условиях. Эти эксперименты доказали экономическую эффективность получения полупроводниковых структур в космическом пространстве. Уже после третьего полета установки Игнатъева, во время которого были получены рекордные характеристики пленок арсенида галлия, права на финансирование четвертого полета были переданы коммерческой фирме Спейсхэб. Однако этому полету не суждено было осуществиться в связи с трагедией миссии шаттла Колумбия, во время которой погибли семеро американских астронавтов, а программа полетов была приостановлена. После этого Игнатъев подключился к реализации нашей программы.

Следует отметить, что первые российские проекты по использованию молекулярного экрана были сформулированы вслед за американцами группой ученых из Зеленограда, занимавшихся проблемами роста полупроводниковых кристаллов в космосе, во главе с доктором наук Евгением Васильевичем Марковым и группой из Ленинградского физико-технического института под руководством профессора Петра Сергеевича Копьева. Эти проекты подвергались тогда серьезной критике, однако многие их положения вошли в современный вариант проекта «Экран», который был подготовлен ИФП СО РАН совместно с группой, работающей в НИИ «Научный центр» (г. Зеленоград), и со специалистами РКК «Энергия» (г. Королев). Было создано и многократно апробировано научно-техническое обоснование для проведения экспериментов по эпитаксии полупроводниковых соединений на кремниевых подложках в условиях космического пространства за молекулярным экраном.

## 3. Орбитальная производственная платформа

Первое крещение проект «Экран» получил во время международной конференции по кос-

мическому материаловедению в июне 1997 года, которая проходила на борту теплохода «Санкт-Петербург». Представительный научный форум собрал более 300 ученых из многих стран мира. Нами был представлен доклад от имени 11 соавторов из трех организаций. После доклада ученый секретарь секции космического материаловедения Борис Захаров поздравил нас с успехом. Его мнение об актуальности и перспективности нашего проекта, как мнение человека глубоко понимающего современное состояние российской космической науки о материалах, имел тогда для нас большое значение и придавал уверенность в успехе. Очень хорошо оценили доклад ведущие специалисты по росту кристаллов в космосе – профессор Александр Чернов, директор лаборатории по росту кристаллов в космосе Центра Маршалла (США), профессор Михаил Мельвидский – руководитель российской космической программы по росту кристаллов, и профессор Татау Нишинага (Япония) – президент международной ассоциации по росту кристаллов и официальный консультант американской программы «Спейс шаттл» по росту кристаллов в космосе. Т. Нишинага согласился быть научным консультантом и нашей программы. Его анализ и советы отличаются глубиной понимания проблем и живой заинтересованностью. Во время вопросов и дискуссий в кулуарах, после обсуждения деталей проекта с коллегами, стало ясно – наш проект будет жить.

На пути к дальнейшей реализации промышленно-ориентированных инновационных технологий получения полупроводниковых структур для солнечной энергетики потребуются создание специализированной автоматической, посещаемой орбитальной производственной платформы (ОПП). В отличие от ранее созданных исследовательских пилотируемых орбитальных станций «Салют», «Мир» и МКС, ОПП должна быть узкоспециализирована на выпуск определенной продукции с максимальной производительностью и предельно высокого качества. Для выполнения этой задачи ОПП должна отвечать следующим требованиям:

- полная автоматизация технологического процесса;
- возможность настройки на производство нескольких видов гетероэпитаксиальных полупроводниковых структур;
- долговременная работа в автоматическом режиме;
- возможность осуществления регламентных и ремонтных работ на орбите при периодических экспедициях посещения;
- минимальное собственное газовыделение в окружающее пространство и, как следствие, отказ от реактивной системы управления и использование силовых гироскопов – гиразинов и эффекта гравитационной стабилизации;

- обеспечение технологического процесса МЛЭ электроэнергией от бортовых солнечных батарей.

Один из возможных вариантов ОПП представлен на рис. 1.

Этот объект имеет:

- четыре установки МЛЭ, каждая из которых имеет молекулярный экран и локальную технологическую установку;
- сменные транспортно-технологические контейнеры барабанного типа, в которых исходные материалы транспортируются на орбиту и готовая продукция возвращается на Землю. В составе ОПП эти же контейнеры выполняют роль склада полуфабриката и готовой продукции;
- манипуляторы для подачи кремниевых пластин из контейнера в технологическую зону МЛЭ и возвращения обработанных пластин в контейнер.

#### 4. Космическая транспортная система

Для транспортировки на орбиту исходных материалов и возвращения на Землю готовой продукции необходима космическая транспортная система, имеющая возможно минимальные затраты на ее эксплуатацию. Это необходимое условие обеспечения экономического приоритета космического промышленного производства перед аналогичными земными технологиями.

Базой для осуществления проекта многоцелевой авиационно-космической системы (МАКС) (рис. 2) был крупнейший в мире самолет Ан-225, где этот самолет выполнял одновременно роль подвижного стартового комплекса и первой ступени системы выведения. В этом проекте был сконцентрирован многолетний опыт работ авиакосмической промышленности страны по многообразным космическим транспортным системам. Однако после осложнения политической ситуации в отношениях между Россией и Украиной этот проект был приостановлен. В настоящее время продолжение этих работ возможно при использовании альтернативных авиакосмических транспортных систем.

Для снижения транспортных расходов желательно обеспечить место базирования космической транспортной системы ближе к промышленным центрам. Это обстоятельство, связанное с полетами над густонаселенными районами и высокой интенсивностью полетов, предъявляет высокие требования по обеспечению безопасности в отношении населения в зоне трасс полетов. Указанным выше требованиям отвечает пилотируемый орбитальный самолет многоцелевого использования МАКС, разработанный в составе проекта «Авиационно-космические произ-

водственные системы» (рис. 2). По экспертным заключениям ЦАГИ и ЦНИИмаш [10], западноевропейских фирм British Aerospace (BAe) [11] и Deutsche Aerospace (DASA) [12], проект МАКС технически реализуем на уровне современных и ближайшей перспективы технологий и имеет удельную себестоимость транспортировки грузов при двухстороннем грузопотоке в диапазоне 1000–2000 долл./кг. Эти экономические характеристики могут обеспечить на первом этапе рентабельное промышленное производство на орбите полупроводниковых наногетероструктур [13–15].

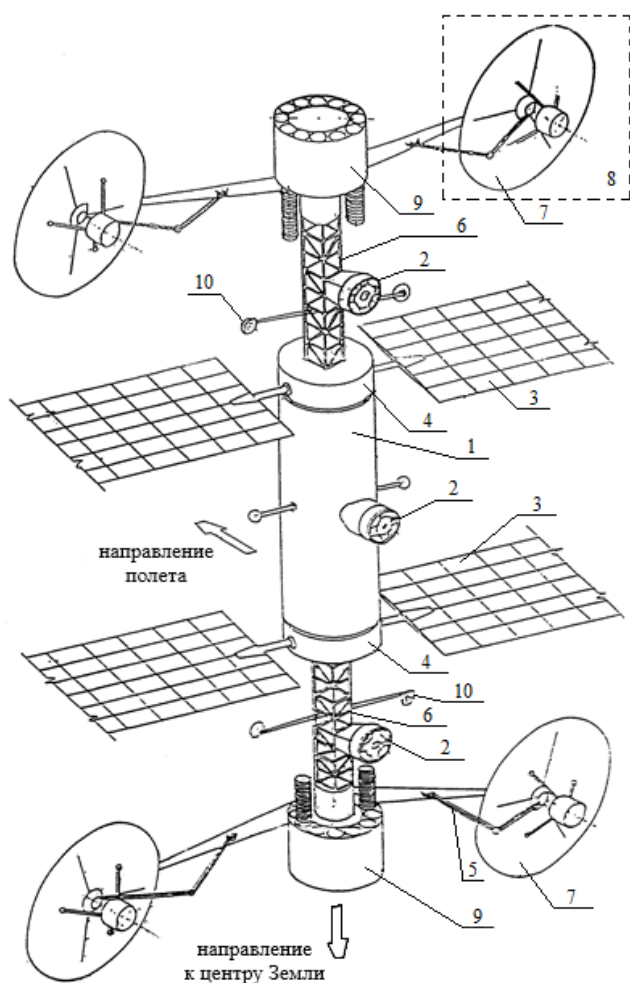


Рис. 1. Вариант внешнего вида ОПП:  
 1 – рабочий модуль; 2 – стыковочный агрегат;  
 3 – солнечные батареи; 4 – вспомогательный модуль; 5 – манипулятор; 6 – гравитационная ферма; 7 – молекулярный экран;  
 8 – технологическая установка МЛЭ;  
 9 – транспортный контейнер барабанного типа;  
 10 – антенны радиотехнического комплекса

Такие высокие экономические показатели транспортной системы можно объяснить:

- высокой кратностью многократного использования составных частей транспортной системы;

- оптимальными проектными решениями по интеграции авиационных и ракетно-космических технологий;

- многоцелевым применением системы, обеспечивающим высокую интенсивность эксплуатации;

- расширением эксплуатационных возможностей по сравнению с существующими средствами.



Рис. 2. Авиационно-космическая система МАКС

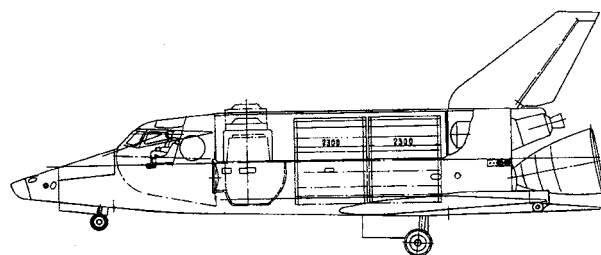


Рис. 3. Орбитальный самолет транспортно-технического обслуживания орбитального производственного комплекса

### 5. Преимущество воздушного старта по отношению к существующим средствам выведения

Использование самолета-носителя в качестве подвижного стартового комплекса по сравнению с традиционными средствами выведения дополнительно предоставляет возможность:

- ликвидировать зависимость от Республики Казахстан при выведении объектов на орбиты с наклоном  $51^\circ$  и на геостационарную орбиту;

- обеспечить доступ космических средств России на низкие орбиты с наклоном  $50...0^\circ$ , которые в настоящее время для нашей страны недоступны;

- значительно (в 2–2,5 раза) снизить стоимость выведения объектов на геостационарную орбиту;

- оперативно выполнять задачи стыковки, аварийного спасения и инспекции.

Размещение стартового оборудования на самолете-носителе, относительно небольшая су-

хая масса второй ступени и значительно меньшее, чем в ракетносителях такого класса, количество специфического ракетного топлива – обеспечивают возможность мобильного базирования системы МАКС на существующих аэродромах. Мобильное базирование значительно повышает живучесть такой системы выведения, с другой стороны это свойство обеспечивает ее экспортно-пригодность [11–15].

## 6. Эскизный проект установки для молекулярно-лучевой эпитаксии в космосе

В данном разделе представлен макет установки для выращивания в космосе полупроводниковых пленок методом молекулярно-лучевой эпитаксии (установка МЛЭ), разработанный в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН совместно с ПАО «РКК «Энергия».

Целью создания макета установки МЛЭ является:

- экспериментальная отработка оборудования для эпитаксии полупроводниковых структур в космосе;
- выращивание экспериментальных образцов полупроводниковых пленок в космосе за защитным экраном;
- наземное изучение выращенных пленок и сравнение их характеристик с характеристиками пленок, выращенных в наземных условиях;
- корректировка конструкции бортовой установки МЛЭ с перспективой создания мини-фабрики по выращиванию эпитаксиальных структур.

В перспективе – создание универсальной автоматизированной космической мини-фабрики по производству материалов методом МЛЭ с характеристиками, превосходящими земные аналоги, а также подготовка проектов для коммерческого освоения промышленных возможностей околоземного космоса.

Конструкция макета установки МЛЭ в закрытом состоянии для транспортировки представлена на рис. 4. Камера (1), крышка (2) с приводом поворота (3), обеспечивающим открывание и герметичное закрывание камеры, система прогрева (4) до 150 °С для дегазации камеры с вакуумной откачкой (на рис. не показана). Перед транспортировкой вакуумно-механической аппаратуры МЛЭ на российский сегмент МКС крышку (2) крепят болтами к камере (1) и отжигают при давлении не выше  $10^{-3}$  Па, после чего заполняют сухим азотом.

Оснастка для проведения технологического процесса содержит: кассету с подложками (7) и приводом перемещения (8), нагреватель подложек (6), размещенные на одинаковых расстояниях от манипулятора (5) (в результате чего передача подложки (14) из зоны хранения кассеты (7) на нагреватель (6) и обратно в кассету производится поворотом манипулятора на 180°). Создание молекулярных пучков и управление ими осуществляется источником молекулярных пучков (ИМП) (9) и заслонками ИМП (10). Управление рабочими параметрами технологической оснастки осуществляется блоком управления и сбора информации (15) и расположенным на траверсе (11) штырем (12) с приспособлением, обеспечивающим замену кассеты с приводом (7, 8) с помощью байонетного соединителя (16). Поручень (13) служит для проведения работ с вакуумно-механической аппаратурой МЛЭ в открытом космосе.

жек (6), размещенные на одинаковых расстояниях от манипулятора (5) (в результате чего передача подложки (14) из зоны хранения кассеты (7) на нагреватель (6) и обратно в кассету производится поворотом манипулятора на 180°). Создание молекулярных пучков и управление ими осуществляется источником молекулярных пучков (ИМП) (9) и заслонками ИМП (10). Управление рабочими параметрами технологической оснастки осуществляется блоком управления и сбора информации (15) и расположенным на траверсе (11) штырем (12) с приспособлением, обеспечивающим замену кассеты с приводом (7, 8) с помощью байонетного соединителя (16). Поручень (13) служит для проведения работ с вакуумно-механической аппаратурой МЛЭ в открытом космосе.

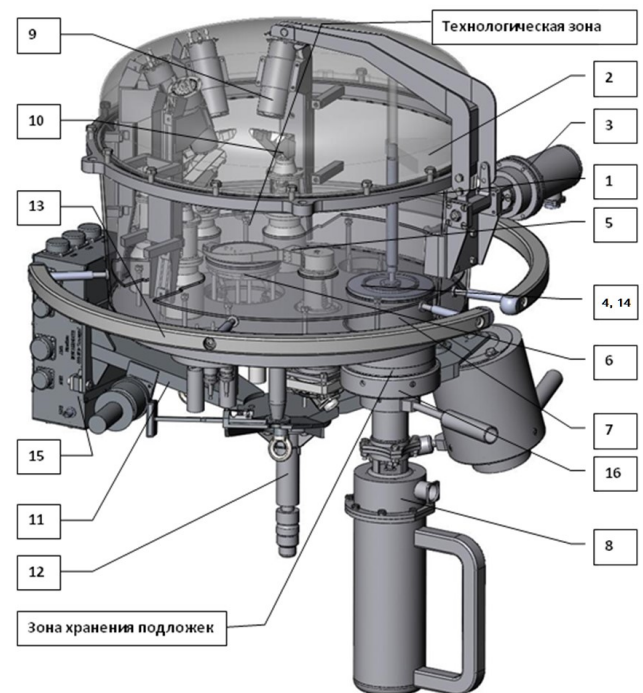


Рис. 4. Конструкция макета установки МЛЭ в закрытом состоянии



Рис. 5. Внешний вид макета установки МЛЭ на стендовых испытаниях

## Заключение

1. Создан научно-технический задел для освоения нового рентабельного направления космической деятельности – промышленного производства новых высококачественных полупроводниковых материалов в условиях орбитального полета, где принципиально возможно получение продукции (монокристаллов и гетероэпитаксиальных структур) более высокого качества, чем в земных условиях. Спроектирован и изготовлен макет установки МЛЭ для проведения экспериментов по получению полупроводниковых гетероструктур в космосе.

2. Научное обоснование базовых технологий промышленного производства на орбите разработано при участии Российской академии наук в лице Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе, Института машиноведения им. А. А. Благонравова, Физико-

технологического института, отраслевых НИИ «Научный центр», ЦАГИ и предприятий промышленности ЦНИИмаш, АО «НПО «Молния» и АНТК «Антонов».

3. Создание орбитальной производственной платформы может осуществляться при использовании большого научно-технического задела по отечественным орбитальным станциям.

4. Рентабельное орбитальное промышленное производство полупроводниковых структур может быть обеспечено при создании космической транспортной системы с удельной себестоимостью двухстороннего грузопотока менее 3000 долл./кг.

5. Разработанный в предыдущие годы проект Многоцелевой авиационно-космической системы показал, что достигнутый уровень авиационных и космических технологий может обеспечить создание космической транспортной системы с экономическими показателями, необходимыми для развертывания рентабельного промышленного производства на орбите.

## Список литературы

- [1] Андреев В. М. Концентраторная солнечная фотоэнергетика // Альтернативная энергетика и экология. 2012. Т. 5–6. С. 40–44.
- [2] Alferov 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] Pchelyakov O. P., Sokolov L. V., Nikiforov A. I., Berzhaty V. I., Zvorykin L. L., Ivanov A. I., Nikitsky V. P., Antropov V. Yu., Biriukov V. M., Markov E. V., Djakov Yu. N. Epitaxy of compound semiconductor from molecular beams in space vacuum behind molecular shield. // Proc. of Joint X Europ. and VI Russian symp. on Phys. Sci. in Microgravity, 1997, vol. II, pp. 144–149.
- [5] Pchelyakov O. P., Blinov V. V., Nikiforov A. I., Sokolov L. V., Zvorykin L. L., Ivanov A. I., Teslenko V. V., Churilo I. V., Zagrebel'nyi A. A. Semiconductor Vacuum Technologies in Space: Hystory, State and Prospects. Poverhnost'(Rus), 2004, vol. 6, pp. 69–76.
- [6] Pridachin D., Pchelyakov O., Nikiforov A., Sokolov L., Preobrazhenskii V., Blinov V. Some design and applying aspects of Molecular Beam Epitaxy (MBE) machine Main Units in Ultra-Vacuum of Space. Proc. of European Planetary Science Congress, Riga, Latvia, 2017.
- [7] Kostoff R. N. Stimulating Innovation. International Handbook of Innovation, Elsevier Social and Behavioral Sciences, Oxford, UK, 2003, pp. 388–400.
- [8] 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.
- [9] Ignatiev A., Freundlich A., Pchelyakov O., Nikiforov A., Sokolov L., Pridachin D., Blinov V. Molecular Beam Epitaxy in the Ultravacuum of Space: Present and Near Future // From Research to Mass Production, 2018, pp. 741–749. doi: 10.1016/B978-0-12-812136-8.00035-9
- [10] Заключение на техническое предложение НПО «Молния» на «Многоцелевой авиационно-космической системе (МАКС)» по теме «Системные исследования и комплексное обоснование технического облика, характеристик и областей рационального использования перспективных многоразовых космических транспортных систем» / НИР «Орел». ЦАГИ, ЦНИИмаш, 1998.
- [11] Parkinson R. C. Multi-purpose aerospace system. Report in ESA, ESTEC and BNSC, British Aerospace, 1992.
- [12] Kramer P. The Russian/Ukrainian Multi Role Space Transport System. DARA – Diskussionskreis, Transportsystem, Bonn, 1994.
- [13] Использование научно-технического задела по ОК «Буря» в части оценки эффективности применения самолета-транспортника ОК «Буря» для сверхтяжелых авиационных перевозок и для задач космической транспортной системы / НИР «Эффективность». Научно-технический отчет. М. : Российская Инженерная Академия, 1999.

- [14] Lozino-Lozinsky G., Skorodelov V., Shkadov L., Plokhikh V. Reasons for decisions made on the MAKS project / 49th International astronomical congress, Melbourne, Australia, 1998.
- [15] Скороделов В. А., Пчеляков О. П. Фундаментальная наука открывает путь к промышленному освоению космоса // Интеграл. 2009. № 3. С. 4–7.

## GROWING SEMICONDUCTOR STRUCTURES FOR HIGH-PERFORMANCE SOLAR CELLS IN OPEN SPACE

**V. V. Blinov<sup>1</sup>, V. M. Vladimirov<sup>2</sup>, N. A. Kushnarev<sup>3</sup>,  
A. I. Nikiforov<sup>1</sup>, D. B. Pridachin<sup>1</sup>, D. O. Pchelyakov<sup>1</sup>,  
O. P. Pchelyakov<sup>1</sup>, V. A. Skorodelov<sup>4</sup>, L. V. Sokolov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> LLC NPF Electron, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>3</sup> Central Research Institute of Infocommunication Technologies and Safety Problems «Nika», Lyubertsy, Moscow region, Russian Federation

<sup>4</sup> JSC «Scientific and Production Association «Molniya», Moscow, Russian Federation

*Practical space activities of the country in near-Earth space and in deep space have been developing for more than fifty years. During this time, many new scientific and technical problems were solved, the latest technologies were developed and mastered. This article describes the prerequisites for conducting an experiment on growing semiconductor structures for highly efficient solar cells in the conditions of orbital flight of an international space station. The advantages of carrying out the process in a deep vacuum formed as a result of the manifestation of the molecular screen effect are shown to obtain new thin-film materials with unique properties. A ground-based simulator of a space module and a working molecular screen prototype are described. The features of the preliminary design of a universal automated installation of molecular beam epitaxy in space are discussed. The rationale for the economic efficiency of space technology based on the absence of the need for expensive ultrahigh vacuum pumping facilities, cryogenic equipment and vacuum volumes containing a large amount of stainless steel is given. The experience of three orbital flights of the American Shuttle spacecraft is analyzed, confirming the economic feasibility of projects related to the production of semiconductor heterostructures in space flight conditions.*

*Keywords: space materials science, molecular beam epitaxy, molecular screen, orbital flight, ultrahigh vacuum.*

### 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] Pchelyakov O. P., Sokolov L. V., Nikiforov A. I., Berzhaty V. I., Zvorykin L. L., Ivanov A. I., Nikitsky V. P., Antropov V. Yu., Biriukov V. M., Markov E. V., Djakov Yu. N. Epitaxy of compound semiconductor from molecular beams in space vacuum behind molecular shield. // Proc. of Joint X Europ. and VI Russian symp. on Phys. Sci. in Microgravity, 1997, vol. II, pp. 144–149.
- [5] Pchelyakov O. P., Blinov V. V., Nikiforov A. I., Sokolov L. V., Zvorykin L. L., Ivanov A. I., Teslenko V. V., Churilo I. V., Zagrebel'nyi A. A. *Semiconductor Vacuum Technologies in Space: Hystory, State and Prospects. Poverhnost' (Rus)*, 2004, vol. 6, pp. 69–76.



- [6] Pridachin D., Pchelyakov O., Nikiforov A., Sokolov L., Preobrazhenskii V., Blinov V. Some design and applying aspects of Molecular Beam Epitaxy (MBE) machine Main Units in Ultra-Vacuum of Space. Proc. of European Planetary Science Congress, Riga, Latvia, 2017.
- [7] Kostoff R. N. Stimulating Innovation. International Handbook of Innovation, Elsevier Social and Behavioral Sciences, Oxford, UK, 2003, pp. 388–400.
- [8] 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.
- [9] Ignatiev A., Freundlich A., Pchelyakov O., Nikiforov A., Sokolov L., Pridachin D., Blinov V. Molecular Beam Epitaxy in the Ultravacuum of Space: Present and Near Future // From Research to Mass Production, 2018, pp. 741–749. doi: 10.1016/B978-0-12-812136-8.00035-9
- [10] *Zaklyuchenie na tekhnicheskoe predlozhenie NPO «Molniya» na «Mnogocелеvoj aviacionno-kosmicheskoy sisteme (MAKS)» po teme «Sistemnye issledovaniya i kompleksnoe obosnovanie tekhnicheskogo oblika, karakteristik i oblastej racional'nogo ispol'zovaniya perspektivnyh mnogorazovyh kosmicheskikh transportnyh sistem»* [Conclusion on the technical proposal of the Molniya NGO on the Multipurpose Aerospace System (MAKS) on the topic «Systemic research and comprehensive justification of the technical appearance, characteristics and areas of rational use of promising reusable space transport systems»] / Research «Orel», TsAGI, TsNIImash, 1998. (In Russian)
- [11] Parkinson R. C. Multi-purpose aerospace system. Report in ESA, ESTEC and BNSC, British Aerospace, 1992.
- [12] Kramer P. The Russian/Ukrainian Multi Role Space Transport System. DARA – Diskussionskreis, Transportsystem, Bonn, 1994.
- [13] *Ispol'zovanie nauchno-tekhnicheskogo zadela po OK «Buran» v chasti ocenki effektivnosti primeneniya samoleta-transportirovshchika OK «Buran» dlya sverhtyazhelyh aviacionnyh perevozok i dlya zadach kosmicheskoy transportnoj sistemy* [The use of scientific and technical groundwork for OK «Buran» in terms of assessing the effectiveness of the use of a carrier aircraft of OK «Buran» for super-heavy air transportation and for the tasks of the space transport system] / Research «Efficiency». Scientific and technical report. Russian Academy of Engineering, Moscow, 1999. (In Russian)
- [14] Lozino-Lozinsky G., Skorodelov V., Shkadov L., Plokhikh V. Reasons for decisions made on the MAKS project / 49th International astronomical congress, Melbourne, Australia, 1998.
- [15] Skorodelov V. A., Pchelyakov O. P. *Fundamental'naya nauka otkryvaet put' k promyshlennomu osvoeniyu kosmosa* [Basic science opens the way to industrial space exploration] // Integral, 2009, no. 3, pp. 4–7. (In Russian)

## Сведения об авторах

*Блинов Виктор Владимирович* – ведущий инженер-конструктор, руководитель группы Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Область научных интересов: технология и принципы конструирования сверхвысоковакуумного технологического и аналитического оборудования для молекулярной эпитаксии.

*Владимиров Валерий Михайлович* – доктор технических наук, доцент, заместитель председателя Президиума Красноярского научного центра СО РАН. Руководитель отдела радиотехники и электроники при Президиуме Красноярского научного центра СО РАН. Место работы: ООО «НПФ Электрон». Область научных интересов: производство радиолокационной, радионавигационной аппаратуры и радиоаппаратуры дистанционного управления, частотно-перестраиваемых фильтров на основе электронного парамагнитного резонанса для станций спутниковой связи.

*Кушнарев Николай Аркадьевич* – доктор технических наук, генерал-майор, заслуженный военный летчик России, генеральный директор ОАО «Центральный научно-исследовательский институт инфокоммуникационных технологий и проблем безопасности «НИКА». Область научных интересов: инфокоммуникационные технологии, информационная безопасность, фундаментальные и прикладные проблемы развития авиации и космонавтики.

*Никифоров Александр Иванович* – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Область научных интересов: механизмы эпитаксиального роста полупроводниковых гетеросистем с наноструктурами для применения в приборах микро-, нано- и оптоэлектроники.

*Придачин Дмитрий Борисович* – ведущий инженер Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Область научных интересов: технология и принципы конструирования сверхвысоковакуумного

технологического и аналитического оборудования для молекулярной эпитаксии, в том числе в космическом пространстве.

*Пчеляков Олег Петрович* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Лауреат государственной премии. Область научных интересов: физические основы выращивания полупроводниковых наногетероструктур из молекулярных пучков в сверхвысоком вакууме и в условиях космического полета.

*Пчеляков Дмитрий Олегович* – ведущий инженер-конструктор Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Область научных интересов: технология и принципы конструирования сверхвысоковакуумного технологического и аналитического оборудования для молекулярной эпитаксии в космическом пространстве.

*Скороделов Владимир Алексеевич* – заместитель главного конструктора НПО «Молния». Принимал участие в разработке орбитального корабля «Буран». Член-корреспондент Академии космонавтики им. К. Э. Циолковского. Область научных интересов: использование факторов орбитального полета в технологических процессах по промышленному производству новых высококачественных материалов и биопрепаратов, производство наногетероэпитаксиальных полупроводниковых структур в условиях космического пространства.

*Соколов Леонид Валентинович* – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель группы Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Область научных интересов: эпитаксия кремния и твердых растворов германий–кремний, разработка и изготовление промышленно-ориентированного оборудования для молекулярно-лучевой эпитаксии.