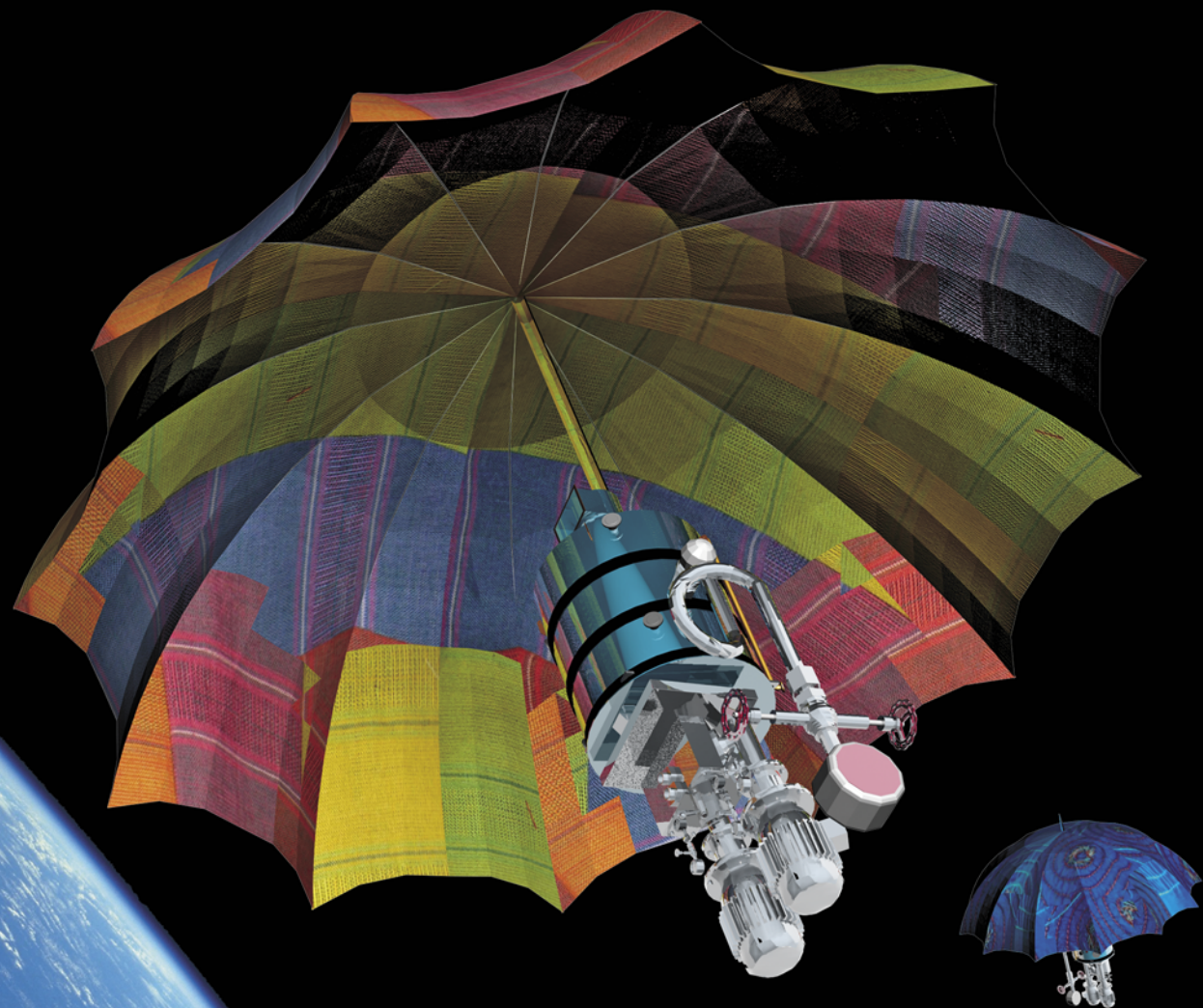


О. П. ПЧЕЛЯКОВ

В КИЛЬВАТЕРЕ — ВАКУУМ



На околоземной орбите, где летают искусственные спутники Земли, давление «атмосферы» в миллионы раз меньше, чем на поверхности планеты. Такие условия близки к идеальным для производства веществ, требующих высокого уровня чистоты, например, полупроводников. Тем не менее для получения сверхчистых материалов, потребность в которых уже сегодня велика, необходим еще более глубокий вакуум. Решение этой проблемы существует — для ультравакуумирования достаточно разогнать в космосе производственный мини-цех до таких скоростей, когда молекулы вещества просто не могут его «догнать»



Полупроводники — весьма delicate материалы: они кардинально меняют свои свойства при попадании в их структуру чужеродных атомов даже в очень малой концентрации. Особенно это катастрофично для тонкопленочных (толщиной менее 0,1 мкм) нанопокровтий. Поэтому синтез таких материалов необходимо осуществлять в предельно «стерильной» обстановке, т. е. в отсутствии кислорода, азота, водяного пара и даже инертных газов. А лучше всего — в глубоком вакууме, ведь чистота материала прямо пропорциональна степени разреженности атмосферы.

Вся история вакуумной техники и связанных с ней технологий 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 криогенных установок, генерирующих сверхглубокий вакуум (остаточное давление порядка 10^{-12} атм), исчисляется миллионами долларов, а общие затраты на разработку новых установок едва ли вообще поддаются оценке.

И чем более сильное разрежение требуется, тем больше расходуется энергии и жидких азота и гелия, необходимых для эксплуатации вакуумного оборудования. Иными словами, технология глубокого вакуумирования является настолько затратной, что доставка оборудования для синтеза полупроводниковых наноструктур в космос, который является «хранилищем» природного вакуума, во многих случаях может оказаться дешевле.

Однако на околоземной орбите даже на тысячекилометровой высоте давление разреженного газа составляет как минимум 10^{-7} атм, а этого недостаточно для получения полупроводниковых наноэлементов надлежащего качества. Однако способ решения проблемы существует: сверхглубокий вакуум можно получить в кильватере предмета, летящего с большой скоростью.

Ключевые слова: вакуумное оборудование, нанотехнологии, эпитаксия, солнечные батареи, космическое материаловедение.

Key words: vacuum equipment, nanotechnology, epitaxy, solar cells, space material science



ПЧЕЛЯКОВ Олег Петрович — доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Член секции «Космическое материаловедение» Координационного научно-технического совета Роскосмоса, член нанотехнологического общества России, член объединенного научного совета СО РАН «Нанотехнологии и информационные технологии». Лауреат Государственной премии РФ (1993). Автор и соавтор 225 научных работ и 10 патентов

Еще более двух тысячелетий назад знаменитый греческий философ Аристотель дал абсолютно правильное определение физическому вакууму: «Пустота (вакуум) — это есть пространство, которое образуется в следе камня, выпущенного из пращи; правда, она моментально исчезает, поскольку сюда устремляются частицы из окружающего пространства...» (Терентьев, 1999). И если бы Аристотель так закончил эту мысль: «...когда мы разгоним камень до скорости, сравнимой со скоростью всех частиц окружающей среды, то за ним в полете всегда будет существовать абсолютно пустое пространство», то он бы стал автором самого современного способа получения сверхглубокого вакуума!

Под молекулярным экраном

Идею получения сверхвысокого вакуума впервые высказал американский физик Р. Н. Костоф еще в 1970 г. Но лишь спустя шесть лет группа американских исследователей во главе с Л. Мелфи провела и опубликовала (без ссылок на Костофа) теоретический анализ состояния газовой среды вокруг летящего в «безвоздушном» пространстве объекта и сформулировала концепцию орбитальной лаборатории, внутри которой будет поддерживаться сверхразрежение. Эта работа проводилась при поддержке Национального управления федерального правительства США по воздухоплаванию и исследованию космического пространства.

Молекулярный экран в простейшем случае представляет собой плоский диск из прочного холодостойкого материала. Когда он летит в космическом пространстве со скоростью (v), в 3—4 раза превышающей среднюю скорость молекул межпланетного газа (u), то лишь крайне незначительная их доля может попасть в зону позади экрана. Поэтому за экраном формируется коническая область сверхразреженной среды



В 1994—1996 гг. американские исследователи провели три серии экспериментов по достижению сверхвысокого вакуума с использованием молекулярного экрана.
Справа – космическая лаборатория под защитой молекулярного экрана в открытом космосе



Мелфи показал, что если в космосе со скоростью нескольких километров в секунду будет лететь защитный экран (в виде поперечно ориентированного по направлению движения диска или полусферы), то в его кильватерной области образуется конусный «след», практически лишенный вещества. На низких орбитах для этого не потребуется и особых затрат энергии, так как речь идет об обычной (первой космической) скорости свободного обращения спутника вокруг Земли.

Теоретически появление одной молекулы кислорода (основного компонента газовой среды на высоте 200—400 км) на площадке в 1 м² тыльной стороны такого экрана придется ожидать тысячи лет. Общее давление среды за экраном будет определяться лишь редкими молекулами гелия и водорода, источником которых является Солнце, а также молекулами веществ, испаряющихся с поверхности самого экрана.

В 1989 г. американским Центром эпитаксии в космическом вакууме (Хьюстонский университет) были инициированы экспериментальные исследования возможности достижения супервакуума в условиях открытого космоса с целью получения полупроводниковых тонкопленочных многослойных систем. Под руководством профессора А. Игнатъева был сконструирован «молекулярный экран» – стальной щит в форме диска, сзади которого располагалось лабораторное оборудование.

Уже в первых космических экспериментах был реально получен вакуум с давлением на два порядка ниже, чем в окружающей среде. При этом не потребовалось дорогостоящее криогенное оборудование, потому что в условиях открытого космоса из рабочей зоны лаборатории естественным образом происходила максимально быстрая откачка всех компонентов газовой среды, включая инертные газы. Нагрев щита солнечными лучами способствовал удалению загрязнений с его поверхности, а остывание в тени земного шара позволяло свести до минимума собственное газоотделение материала щита, поэтому сверхнизкое давление во время синтеза полупроводниковых пленок было стабильным.

Три серии натурных экспериментов, проведенные в 1994—1996 гг., дали много важной научной и технологической информации о возможности по-

Американская космическая лаборатория под молекулярным экраном сегодня в качестве исторической реликвии хранится в Центре перспективных материалов университета г. Хьюстон. Второй справа – создатель экспериментальной установки профессор университета А. Игнатъев

Для создания многослойных тонкопленочных полупроводниковых материалов толщиной менее 0,1 мкм успешно используется метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) – ориентированного наращивания одного кристаллического материала на поверхность другого.

С помощью этого метода уже сегодня получают уникальные наноструктуры, которые могут быть использованы в качестве элементной базы нанoeлектроники и нанofотоники будущего, в том числе ультравысокочастотных транзисторов, высокочувствительных фотоприемных устройств в широком диапазоне длин волн, высокоэффективных лазеров вплоть до испускающих одиночные фотоны



Первая встреча основных исполнителей проекта «Экран» – сотрудников ИФП СО РАН и РКК «Энергия» – состоялась в 1995 г.

Слева направо: проф. О. П. Пчеляков, к. ф.-м. н. А. И. Никифоров, к. т. н. А. И. Иванов; В. А. Зименков, к. ф.-м. н. Л. Л. Зворыкин, к. ф.-м. н. Л. В. Соколов

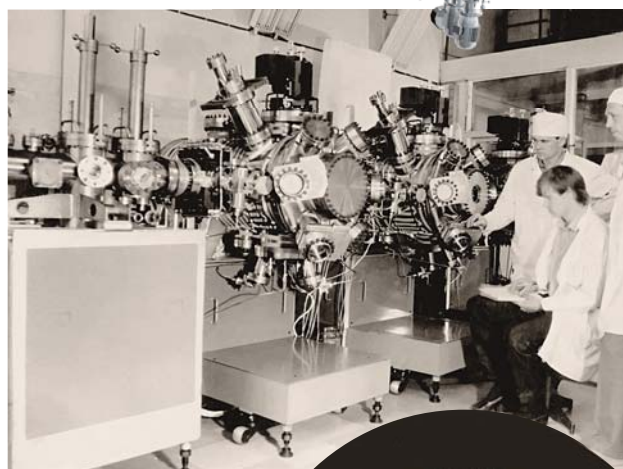


лучения уникальных полупроводниковых материалов в открытом космосе, где отсутствуют принципиальные ограничения традиционных наземных вакуумных технологических процессов. Однако после трагической гибели в 2003 г. экипажа корабля «Колумбия» американские эксперименты были приостановлены.

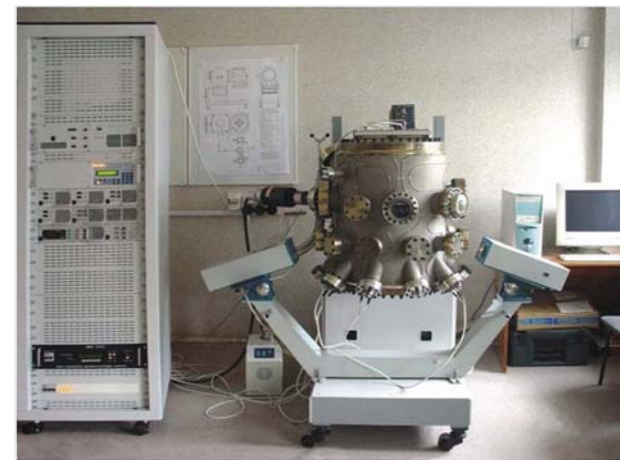
Русские не отстают

Исследовательские работы по использованию космического вакуума для выращивания полупроводниковых тонкопленочных многослойных систем и наноструктур проводятся не только в США. В нашей стране одним из лидеров в области сверхвысоковакуумной технологии и оборудования является Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (Новосибирск). Среди направлений его деятельности не последнее место занимает промышленно-ориентированное производство многослойных тонкопленочных полупроводниковых материалов, в частности методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Предложенный институтом проект «Экран» по выращиванию тонкопленочных композиций на российском орбитальном комплексе «Мир» был впервые рассмотрен на совещании секции космического материаловедения Совета по космосу РАН в 1995 г. и получил поддержку экспертов. Вскоре в Новосибирске по заказу Международного научно-технического центра (МНТЦ) полезных нагрузок космических объектов (г. Мытищи) и Ракетно-космической корпорации (РКК) «Энергия» им. С. П. Королева (г. Королев) был спроектирован и изготовлен первый в стране имитатор космического



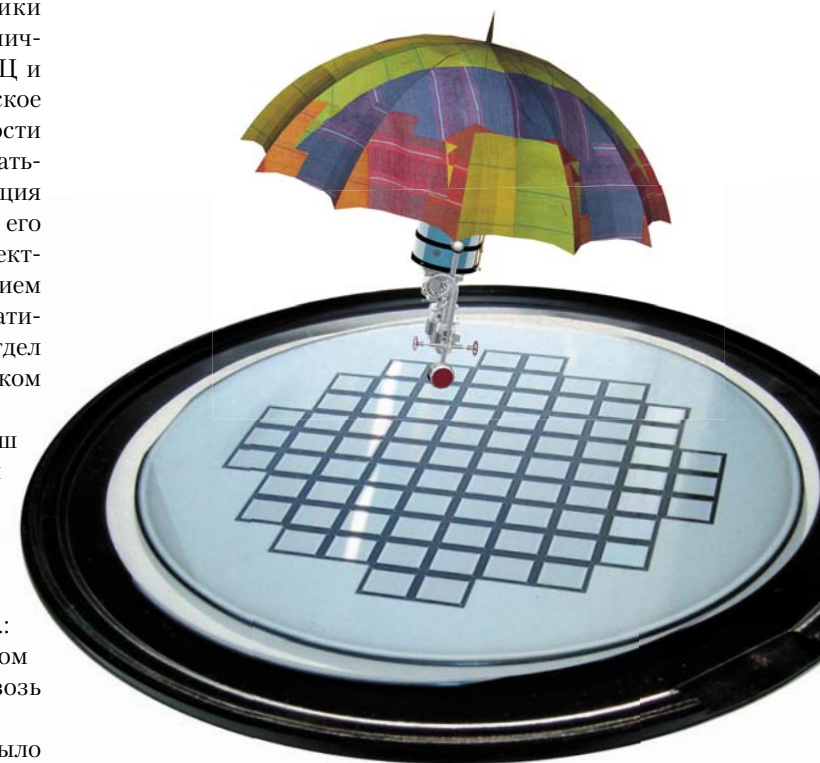
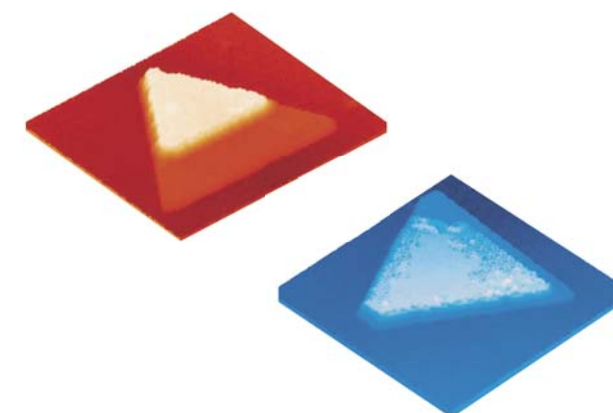
На сборочном участке Опытного завода СО РАН в Новосибирске было изготовлено более 80 экспериментальных и промышленных вакуумных установок. Фото 1986 г.



Испытательный стенд «Эпицентр» для имитации сверхглубокого космического вакуума разработан в Институте физики полупроводников СО РАН в 2010 г. Он предназначен для наземной отработки экспериментов по эпитаксии в условиях орбитального полета.

Внизу – атомарно-чистая поверхность кремния и демонстрационный образец кремниевой пластины, на которую нанесены наноструктурные элементы солнечных батарей нового поколения, произведенный на вакуумном оборудовании в ИФП СО РАН совместно с НПП «Восток».

Туннельная микроскопия. Фото к. ф.-м. н. С. Тийса (ИФП СО РАН)

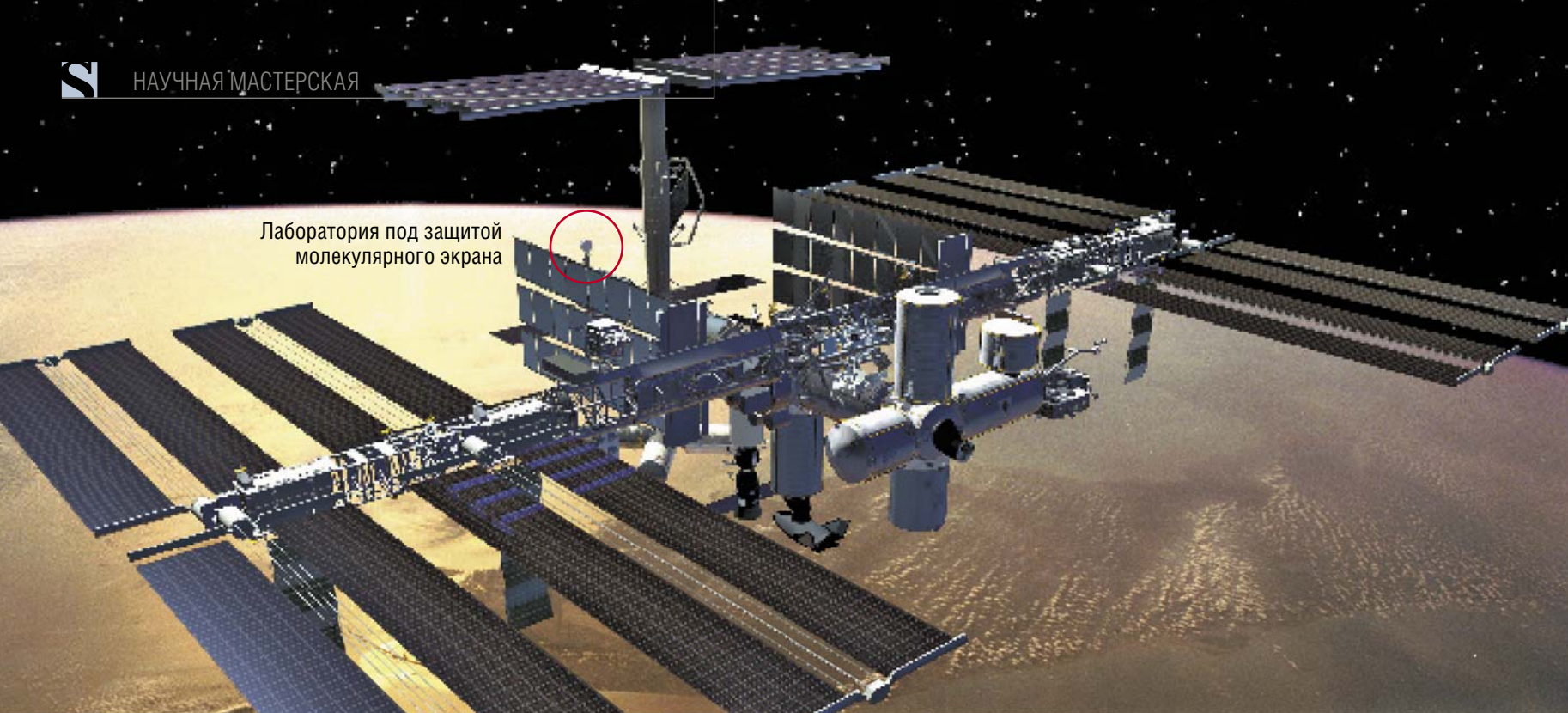


вакуума. В рамках программы «Эпитаксия» секции фундаментальных космических исследований РАН и договора на выполнение особо важных работ для государственных нужд в ИФП было разработано и испытано технологическое оборудование для выращивания полупроводниковых пленок в условиях открытого космического пространства.

Что касается самого экрана, обеспечивающего сверхглубокий вакуум, то его создание явилось результатом успешной межинститутской, межведомственной и даже межгосударственной кооперации. Так, в новосибирском Институте теоретической и прикладной механики СО РАН был сделан газодинамический расчет различных вариантов формы экрана. Сотрудники МНТЦ и РКК выполнили экспериментальное и теоретическое исследование состояния газовой среды в окрестности космических объектов, на которых он будет базироваться. Там же была разработана оригинальная конструкция экрана и контрольно-измерительная аппаратура, а его опытный образец был изготовлен в Институте электросварки им. Е. О. Патона (Киев, Украина). Созданием систем энергоснабжения и бортовых средств автоматизации и телеметрии в наземном варианте занялся отдел электронной системотехники ИФП, а в космическом исполнении – фирма «Электрон» (г. Красноярск).

В отличие от американского плоского «щита» наш экран выглядел как ажурный «зонтик», на спицы которого была натянута многослойная фольга со специальным покрытием, позволяющим предотвратить испарение с поверхности. Первые испытания деталей конструкции молекулярного экрана успешно прошли на орбитальной станции «Мир» в 1998 г.: материал экрана выдержал пребывание в открытом космосе даже в период прохождения Земли сквозь метеорный поток «Леониды».

Однако дальнейшим планам ученых не суждено было осуществиться: 21 марта 2001 г. орбитальная станция



Лаборатория под защитой молекулярного экрана

МКС обеспечивается электроэнергией благодаря работе солнечных панелей. Их общая площадь около 4 тыс. м²

«Мир» была затоплена в водах Тихого океана. За этим событием последовало и прекращение финансирования космических проектов.

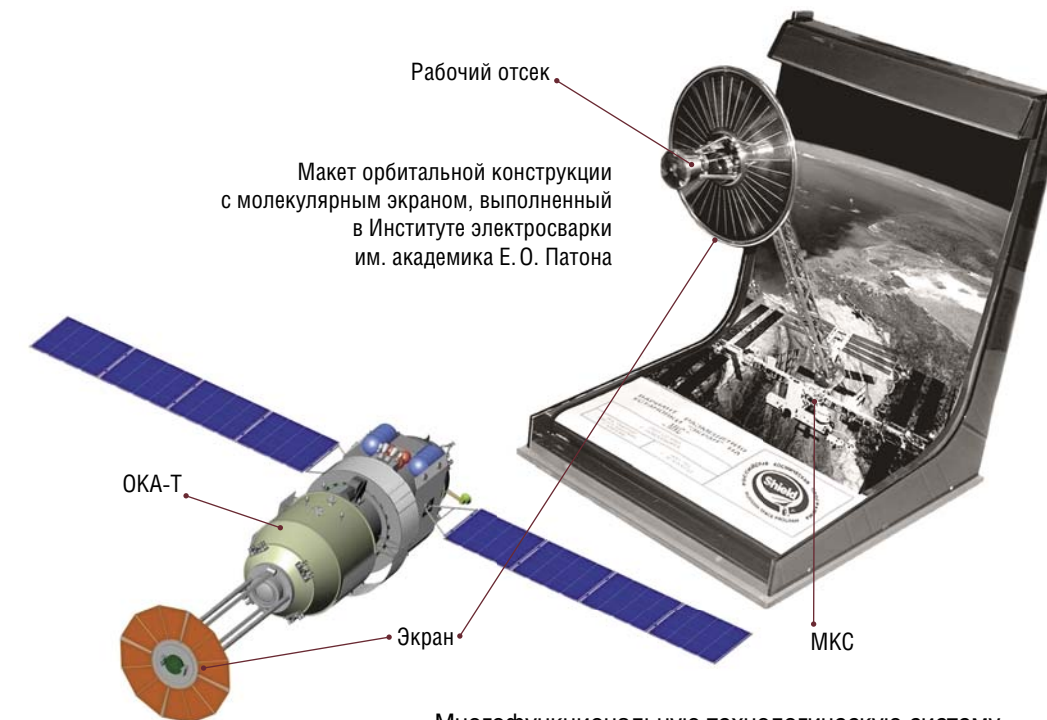
Однако история на этом не заканчивается. В 2004 г. был подписан Меморандум о сотрудничестве в области космического материалоустройства между Хьюстонским университетом и ИФП СО РАН. Проект «Экран» стал международным. Через два года к нему присоединился и казахстанский Физико-технический институт (г. Алматы). В ИФП возобновилась работа над созданием новой научной аппаратуры для экспериментов по эпитаксии, теперь уже в условиях российского сегмента Международной космической станции.

В 2006–2009 гг. в рамках работы над проектом на Опытном заводе СО РАН и экспериментальном производстве ИФП при участии Конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН было изготовлено два комплекта наземного сверхвысоковакуумного оборудования для выращивания полупроводниковых наноструктур. Эти установки были размещены в Новосибирском государственном техническом университете и Томском государственном университете.

Ближайший этап совместных работ связан с наземными экспериментами по отработке технологии синтеза разнообразных полупроводниковых наноэлементов для электронных приборов и фоточувствительного оборудования. Для этого в институте был разработан имитатор космического вакуума «Эпицентр», который сейчас проходит лабораторные испытания. Копию этого оборудования предполагается установить на кафедре технической физики Сибирского аэрокосмического университета (г. Красноярск), где будут готовить специалистов по новой космической технологии. В дальнейшем планируется изготовление аналогичного оборудования также для американской и казахстанской сторон.

Вакуум необходим не только для производства полупроводников. Есть химические и биохимические процессы, крайне чувствительные к малейшим примесям в среде. И в будущем космические вакуумные технологии могут использоваться в самых разных, зачастую неожиданных, областях.

Однако в ближайшей перспективе основная коммерческая выгода от этой технологии связана с производством высокоэффективных солнечных батарей, которые очень востребованы в космосе, где нет других источников энергии. Благодаря таким установкам, как молекулярный экран, можно будет изготавливать эти батареи непосредственно на орбите и там же их эксплуатировать.



Рабочий отсек

Макет орбитальной конструкции с молекулярным экраном, выполненный в Институте электросварки им. академика Е. О. Патона

ОКА-Т

Экран

МКС

Многофункциональную технологическую систему «Экран», предназначенную для выполнения работ в условиях ультравакуума, планируется разместить на Международной космической станции, а затем на российском орбитальном космическом аппарате ОКА-Т. Рабочий отсек размещен за молекулярным экраном – «зонтиком» диаметром около 3 м, на который натянута многослойная фольга с особым покрытием для предотвращения накопления статического заряда и испарения вещества

Литература

Бержатый В. И. и др. Перспективы реализации вакуумных технологий в условиях орбитального полета // Автоматическая сварка, 1999. № 10. С. 108–116 // Поверхность, 2001. № 9. С. 63–72.

Пчеляков О. П. и др. Полупроводниковые вакуумные технологии в космическом пространстве: история, состояние, перспективы // Поверхность, 2004. № 6. С. 69–76.

Терентьев М. В. Об истории и развитии понятия физического вакуума. М.: Фазис, 1999.

Pchelyakov O. P. et al. 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. On physical sciences in microgravity, 1997. V. II. P. 144–149.

Strozier J. A. et al. Wake vacuum measurement and analysis for the wake shield facility free flying platform // Vacuum, 2002. V. 64. P. 119–144.

В публикации использованы фото из архива автора и В. Новикова

