

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 p-n 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 p-n 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

© Пчеляков О. П., 2018

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 особочистых, высокосовершенных 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 нанoeлектроники. 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 многоазового 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 Spacehab, 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 многоазового 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 нанoeлектроники. 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 ~ 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 мкм 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 разбит 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, АЗВ5 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] 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] 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

234

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*

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 ehpitaksii 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)