

УДК 523.68:621.315.3

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

© 2004 г. О. П. Пчеляков¹, В. В. Бликнов¹, А. И. Никифоров¹, Л. В. Соколов¹,
Л. Л. Зворыкин², А. И. Иванов², В. В. Тесленко², И. В. Чурило², А. А. Загребельный³

¹Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

²РКК “Энергия”, им. С.П. Королева, Королев, Россия

³ИЭС им. Е.О. Патона, Киев, Украина

Поступила в редакцию 10.10.2003 г.

Рассмотрены предпосылки, примеры 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 МЛЭ.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений космического полупроводникового материаловедения является разработка наукоемких технологий, связанных с использованием глубокого вакуума, образующегося в открытом космосе вблизи орбитальных станций при использовании эффекта “молекулярного экрана”. К таким технологиям в первую очередь относится 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 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 A^4B^4 , A^3B^5 и A^2B^6 . На кремниевых пластинах большого диаметра такие эпитаксиальные структуры могли бы сыграть роль альтернативных универсальных подложек для получения широкого круга гетероструктур для приборов оптоэлектроники, микро- и наноэлектроники. Разработка и реализация этого нового поколения полупроводниковых структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии приведет к 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.

ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Как показывает анализ работ, опубликованных в научной печати и в сети Интернет, 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 тонко-

пленочных 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 [8]. в настоящее время подобные работы ведутся только в США и в России. Исследования США были инициированы в 1989 году Центром эпитаксии в космическом вакууме (Университет г. Хьюстон). В России они были начаты в 1996 году отделом молекулярной эпитаксии Института физики полупроводников СО РАН в сотрудничестве с РКК “Энергия” им. С.П. Королева и НИИ “Научный центр” 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 [1, 2] и сформулировали концепцию орбитальной лаборатории со сверхразреженной средой [3]. Следует также отметить, что агентством НАСА еще в 80-е годы в рамках программы SPACELAB планировалась разработка восьми установок многоразового использования для получения новых материалов в космосе, и среди них был “молекулярный экран”. Однако отсутствие в то время интереса к этому устройству со стороны представителей 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, C.W. Chu) в 1985 году. В 1988 году при Университете в Хьюстоне 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 [4, 5]. В прошлые годы государственные субсидии в каждый из этапов проекта WSF составляли около 15 миллионов долларов. С 1999 года к финансированию этой программы подключилась коммерческая компания SPACEHAV, которая вложила 275 миллионов долларов в космические проекты, обещающие прибыль. В 2000 году в расширение Центра по эпитаксии в космосе (Хьюстон) вложен более 15 миллионов долларов [6]. На этот раз запланировано использование установки нового поколения с большой производительностью для приборной реализации эпитаксиальных структур в наземных условиях. Конечной целью этой программы является создание к 2005 году минифабрики на орбите по полу-

чению полупроводниковых эпитаксиальных пленок с рекордными характеристиками для приборов оптоэлектроники, микро- и наноэлектроники. Производительность такой установки предполагается довести до 3500 пластин в год, что обеспечит производство около 10 миллионов приборных структур. За этот период на орбиту и обратно будет доставлено всего 100 кг груза.

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

Результаты первых экспериментов проекта WSF и принятая программа дальнейших работ по промышленному производству эпитаксиальных материалов в космосе подтверждают перспективность развития этой новой космической технологии полупроводникового материаловедения.

ОСОБЕННОСТИ РОССИЙСКОГО ПРОЕКТА

В 1996 году нами были начаты работы по проекту “Эпитаксия гетероструктур на Si в условиях космоса” (шифр “Эпитаксия”). Основной задачей этого проекта является 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 является поэтапная разработка и создание штатного образца вакуумно-механической аппаратуры молекулярно-лучевой эпитаксии для космического эксперимента “Экран-М” (ВМА МЛЭ), который должен обеспечивать реализацию научных экспериментов и отработку технологического процесса МЛЭ. При этом рост пленок должен осуществляться в технологической СВВ-зоне (создаваемой на низкоорбитальных беспилотных космических аппаратах (КА) в окрестности или вблизи РС МКС за защитным молекулярным экраном, поверхность которого расположена перпендикулярно вектору скорости движения этого экрана.

Сотрудниками РКК “Энергия” проведены методические расчетные исследования уровня разрежения за защитным экраном в условиях орбитального полета пилотируемых объектов [5].

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 газовыделения с “теневого” поверхности экрана в область аэродинамического следа не превышают 10^{-10} Па $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Такой уровень газовыделения 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^{-10} Па.

Защитный экран, ориентированный перпендикулярно направлению полета, вырезает коническую зону аэродинамического следа, течение в которой формируется попавшими в эту зону частицами газа из набегающего потока и потоком частиц собственного газовыделения 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 газовыделения с его поверхности и эффекта экранирования набегающего потока. Показано, что указанные выше уровни газовыделения в область следа за экраном незначительно влияют на конфигурацию границы области высокого вакуума (изобара $P = 10^{-10}$ Па изображена на рис. 1). 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 собой цилиндрическую область с диаметром порядка 0.7 м и с протяженностью от днища экрана ~ 1.5 м, т.е. вполне допускает размещение в ней технологической, научной, а также контроль-измерительной аппаратуры.

Результаты расчетов также показывают, что из окружающей среды в зону разрежения за экраном попадают только “быстрые” молекулы легких компонентов верхней атмосферы (He и H), скорости теплового движения которых существенно превышают орбитальную скорость (7800 м/с). Их парциальные давления на высоте полета орбитальных кораблей и станций ($H \sim 300$ км) на пять–шесть порядков ниже по сравнению с парциальным давлением при газовыделении. Теоретически суммарное давление в этой области, определяемое водородом и гелием, может быть менее 10^{-12} Па (при парциальном давлении водорода $< 10^{-12}$ Па, гелия $< 10^{-16}$ Па и почти бесконечной скорости откачки по всем компонентам газовой среды, включая инертные газы) [9]. Для сравнения следует отметить, что в наземных сверхвысо-

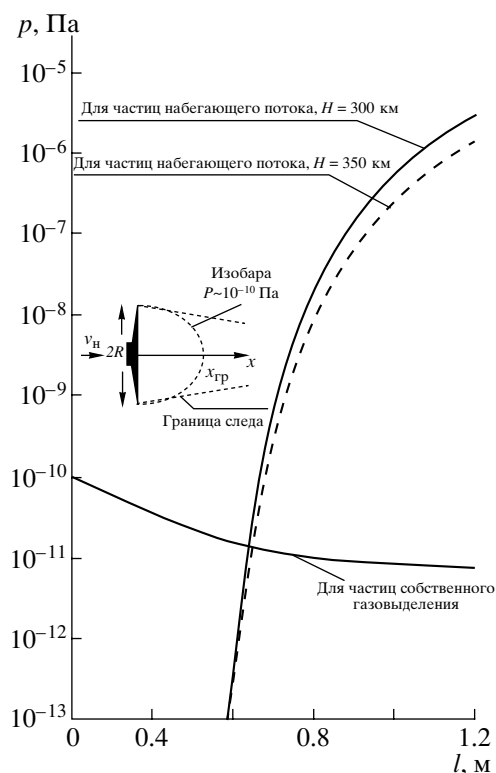


Рис. 1. Уровни разрежения за молекулярным экраном при поперечном обтекании в условиях орбитального полета.

ковакуумных технологических установках с криогенными насосами достигается предельное разрежение не лучше 10^{-10} Па. Предельно достижимый вакуум на входе в одном из лучших в мире гелиевых насосов (В.А. Гражулис, М.П. Ларин) получен на уровне 10^{-11} Па [10].

Однако при проведении работ по организации “космического” вакуума за защитным экраном на пилотируемых орбитальных объектах необходимо учитывать образующуюся около них собственную внешнюю атмосферу (СВА). Она представляет собой комплексное динамическое образование, включающее в себя газовую, аэрозольную, и мелкодисперсную фазы, и оказывает негативное влияние на результаты астрофизических, геофизических, материаловедческих и технических исследований и экспериментов. Аэрозольные и дисперсные частицы имеют характерные размеры от 0.1 мм до нескольких миллиметров и фиксируются, как правило, на расстояниях до 15 м от поверхности объекта [7, 10].

В стационарном состоянии СВА при длительном отсутствии динамических операций (например, при гравитационной стабилизации), давление газовой фазы СВА у поверхности объекта составляет по расчетным оценкам $\sim 10^{-4}$ – 10^{-3} Па, что подтверждается данными натурных измере-

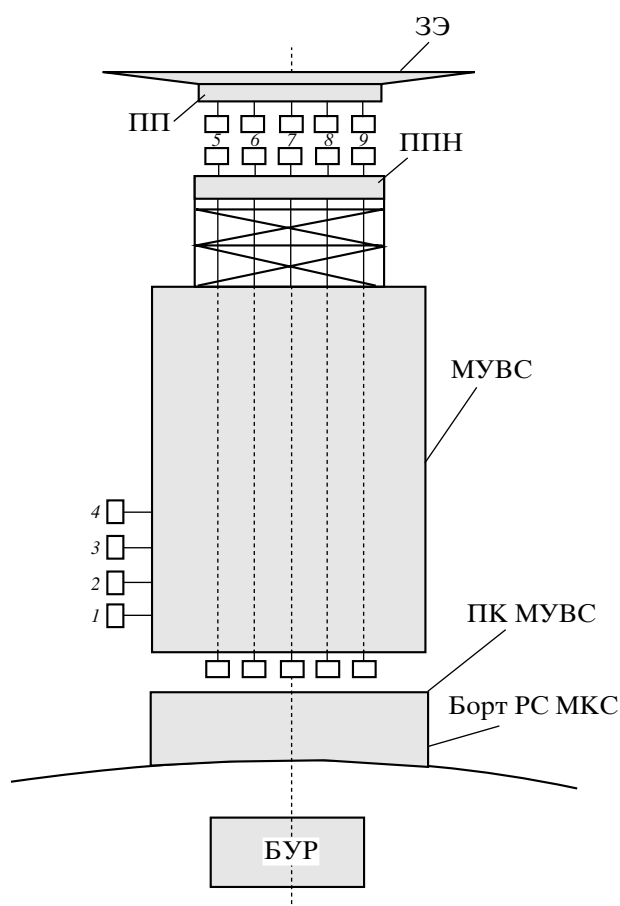


Рис. 2. Схема экспериментальной установки "Тюльпан", 1–9 – порядковые номера.

ний на ОК "Мир". На расстояниях порядка 10 м от поверхности ОК давление в СВА не превышает 10^{-5} Па. При динамических операциях, когда работают длительные 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 разработана специализированная установка "Тюльпан", снабженная подвижным молекулярным защитным экраном и выносным устройством для обеспечения обтекания защитного экрана невозмущенным набегающим потоком на высотах орбитального полета. В состав основных узлов экспериментальной установки "Тюльпан" (рис. 2), входят: многозоровое устройство выдвигания и складывания (МУВС); защитный экран (ЗЭ) с поворотной платформой (ПП); платформа полезной нагрузки (ПН); платформа крепления (ПК); контроль-измерительная и научная аппаратура (КИА и НА), устанавливаемая на ППН; силовые и информационные кабели; блок управления и регистрации (БУР) для обеспечения питания и управления всеми узлами и механизмами установки, а также для

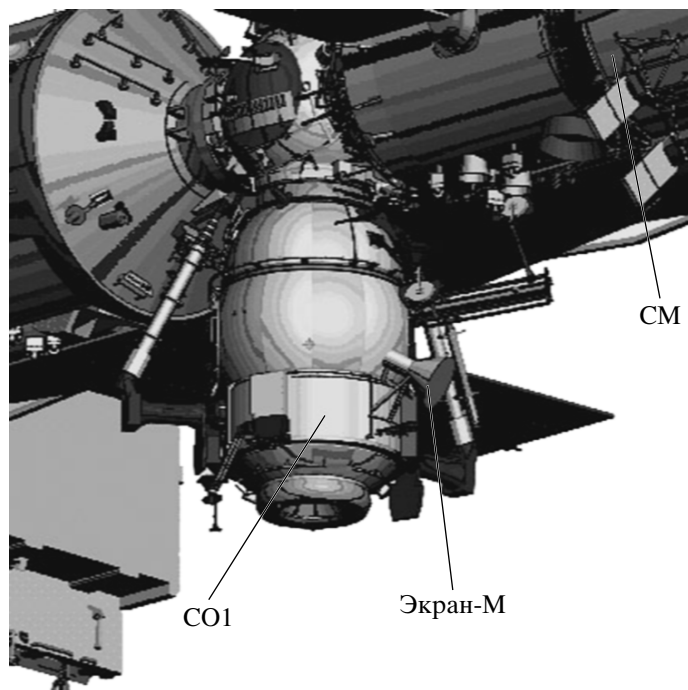


Рис. 3. Размещение установки МЛЭ за малым защитным экраном. СО1 – стыковочный отсек, СМ – стыковочный модуль.

первичной обработки информации и ее передачи на бортовые записывающие устройства и на Землю.

В настоящее время отрабатываются конструктивные решения первой очереди установки МЛЭ, которую планируется смонтировать за защитным экраном, расположенном на корпусе стыковочного отсека (рис. 3).

На последующих этапах работы будут созданы: бортовая установка МЛЭ, оснащенная дополнительной контрольно-измерительной и диагностической аппаратурой и размещаемая за защитным экраном (ЗЭ) диаметром ~ 3 м; бортовой комплекс “Тюльпан” (БКТ), обеспечивающий удаление аппаратуры МЛЭ на 18–20 м от модулей станции (СМ или НЭМ), а также ориентацию ЗЭ перпендикулярно набегающему потоку; автоматизированная технологическая установка МЛЭ для синтеза полупроводниковых многослойных материалов в составе перспективного свободноплетающего технологического корабля-модуля (СТКМ).

При проведении технологических исследований будут использоваться следующие факторы орбитального полета:

1. Глубокий вакуум и почти неограниченная производительность откачки компонентов 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.

2. Отсутствие стенок рабочей камеры, накапливающих и отдающих компоненты молекулярных пучков и атмосферы остаточных газов. Это позволит устранить влияние упомянутого эффекта “памяти”, а также формировать многослойные структуры, содержащие большое число различных по составу слоев со строго заданными профилями легирования.

3. Возможность пространственного удаления элементов технологической оснастки и аналитических средств гот 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 для подложек большого диаметра.

4. 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.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Установка МЛЭ (рис. 4) содержит механизм транспорта подложек с нагревателем 1, блок молекулярных источников 2, несущий фланец 3 с устройством позиционирования подложки 4 и заслонкой 5. На несущем фланце установлены герметичные вакуумные электровводы и элементы крепления несущего фланца к защитному молекулярному экрану. Эти элементы позволят также закрепить фланец с технологической оснасткой на верхнем торце вакуумной камеры имитатора (рис. 5) или в вакуумном контейнере для транспортировки установки МЛЭ (рис. 6) на борт орбитальной станции.

Механизм транспорта подложек 1 закреплен герметично на несущем фланце 3 и содержит резистивный нагреватель подложек (на рисунке не показан) и носитель подложек барабанного типа с электромеханическим приводом (на рисунке не показан), который служит для хранения подложек и подачи их на технологическую позицию. Температура нагревателя может контролироваться термодарами или по току в спирали нагревателя.

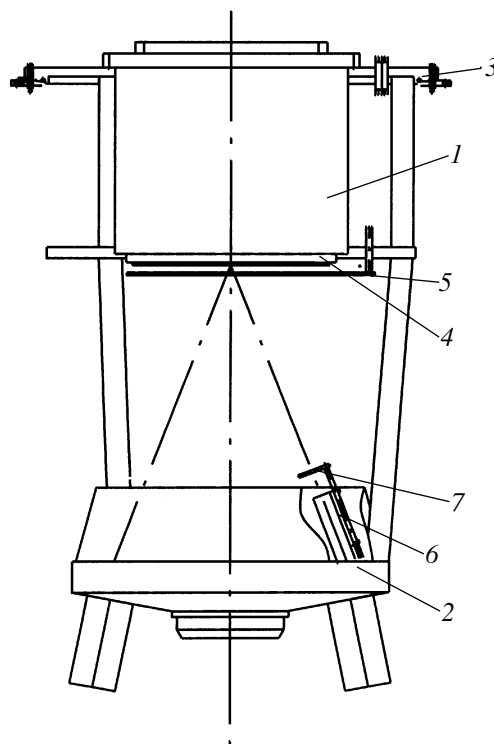


Рис. 4. Схема установки МЛЭ “Экран-М”.

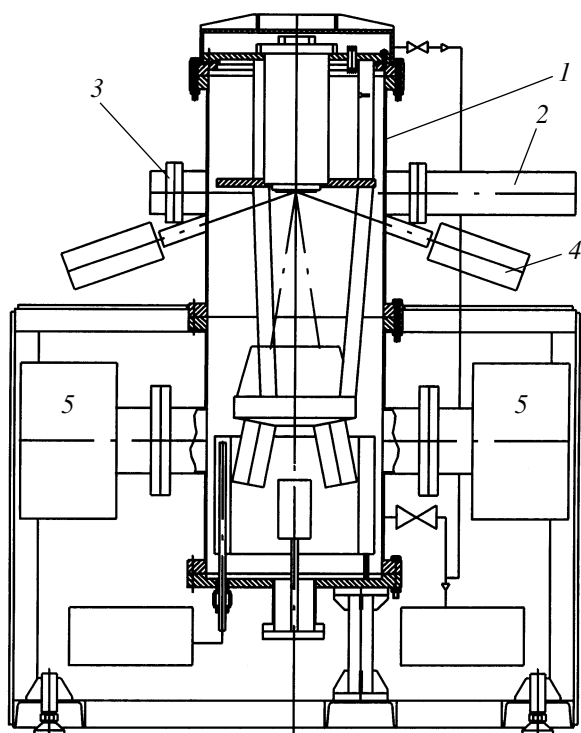


Рис. 5. Схема стенда-имитатора: 1 – вакуумный объем стенда, 2 – пушка ДБЭ, 3 – люминесцентный экран, 4 – автоматический эллипсометр, 5 – магнитоэлектрические насосы.

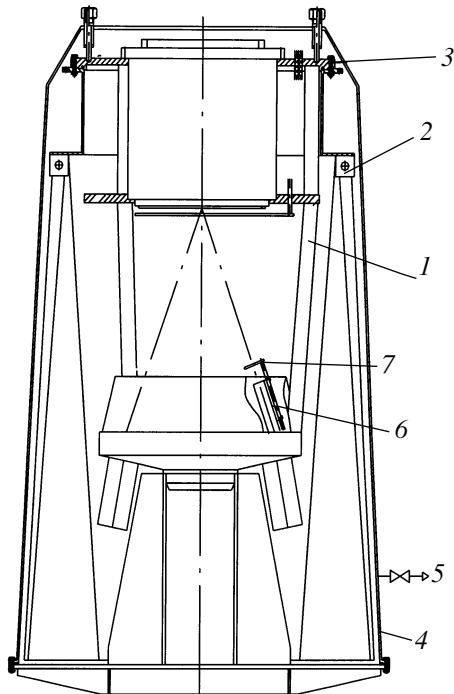


Рис. 6. Схема вакуумного контейнера.

Установка сочетает возможности получения пленок как из молекулярных, так и из газовых источников. В связи с этим в состав блока источников 2 входят тигельные и газовые молекулярные источники (МИ) на рисунке не показаны), газовые баллоны с системой газораспределения и питания. Управление молекулярными потоками производится электромагнитными заслонками 7 и температурой тиглей. Управление молекулярными потоками из газовых источников производится редукторами, натекалками и температурой газовых баллонов и формирователей молекулярных пучков, снабженных датчиками температуры.

Автоматическое управление технологическим процессом при проведении космического эксперимента по выращиванию тонкопленочных структур осуществляется блоком управления. В его функции входят: подача команд на установку подложки в технологическую позицию, фиксация номера обрабатываемой подложки, нагрев, измерение температуры нагревателя подложки, управление заслонкой подложки, управление режимами работы МИ при выращивании эпитаксиальных структур, управление заслонками МИ.

Установка МЛЭ 1 (рис. 6) крепится несущим фланцем 3 к защитному молекулярному экрану 2 и устанавливается в контейнер 4 для транспортировки в космическом аппарате. Контейнер выполнен герметично и снабжен вакуумным вентилем 5 для откачки или заполнения инертным газом. Для уменьшения паро- и газоотделения из металлов в процессе эксперимента (вносящих загрязнение в выращиваемую структуру), конструкции ВМА МЛЭ и защитного молекулярного экрана должны быть отожжены (предварительный отжиг до 450°C на земле и отжиг непосредственно перед экспериментом от 150°C до 200°C). Стенд-имитатор наземный (СИН) (рис. 5) должен имитировать технологическую зону за защитным экраном и предназначен для проверки работоспособности технологических элементов, проведения их испытаний, настройки и градуировки МЛЭ и отработки алгоритмов и циклограмм. Стенд содержит вакуумную камеру 1, снабженную средствами откачки: блоком предварительной откачки; магнитоэлектрическими насосами НМД-04; сублимационным насосом, состоящим из криопанели и сублиматора, которые обеспечивают давление в камере 1 до 10^3 Па. Герметичность фланцевого соединения обеспечивается прокладкой из витона. Контроль параметров среды в камере 1 осуществляется датчиком давления и масс-спектрометром (на рис. 5 не показаны), а контроль параметров выращиваемых пленок дифрактометром – 2 с люминесцентным экраном 3 и с помощью лазерного эллипсометра 4.

Автоматическое управление технологическим процессом при проведении эксперимента по вы-

ращиванию тонкопленочных структур в СИН ВМА МЛЭ осуществляется блоком управления, который должен обеспечивать установку выбранной подложки в технологическую позицию, нагрев подложки, измерение температуры нагревателя подложки, управление заслонкой подложки управление режимами работы источников при выращивании эпитаксиальных структур, управление заслонками.

Изготовленный комплект ВМА МЛЭ должен быть установлен на СИН ВМА МЛЭ для проведения операций по получению сверхвысокого вакуума ($p \leq 10^{-8}$ Па): отжиг при температуре от 100°C до 150°C с предварительной откачкой до давления ($p \leq 10^{-1}$ Па); откачка насосами НМД-04 до давления ($p \leq 10^{-6}$ Па); откачка сублимационным насосом до давления ($p \leq 10^{-1}$ Па). После проверки функционирования аппаратуры тигли МИ и нагреватель подложек должны разогреваться до рабочих температур, заслонки МИ и нагревателя подложек должны открываться, закрываться; подложка с заданными номером должна выставляться на технологическую позицию; должен быть снят спектр масс и проведены предварительные испытания дифрактометра и эллипсометра. После проведения предварительных испытаний в установке загружают тигели исходным материалом для создания молекулярных пучков, устанавливают газовые баллоны с исходным газом, в транспортер ПН устанавливают подложки и проводят операции по получению СВВ, после чего производится разогрев газовых и тигельных МИ, подготовка подложки на технологической позиции и производится запуск аналитических приборов – масс-спектрометра, дифрактометра, эллипсометра. После получения в камере спектра масс, удовлетворяющего режиму технологического процесса, открываются заслонки МИ и подложки, и испаряемый в тиглях МИ материал и газ из формирователя молекулярных пучков образуют молекулярные пучки, взаимодействующие с поверхностью подложки, обеспечивая рост полупроводниковых структур на ее поверхности. Контроль качества структур осуществляется по дифракционной картине, получаемой на экране в результате дифракции и отражения пучка электронов, выходящих из пушки дифрактометра, от поверхности подложки. Другим методом контроля выращиваемых структур является эллипсометрия, позволяющая контролировать состав и толщину эпитаксиальных пленок.

С помощью этих методы контроля производится наработка технологических режимов роста полупроводниковых структур, которые должны в дальнейшем использоваться для создания программ автоматического роста полупроводниковых структур без применения аналитических приборов (масс-спектрометра, дифрактометра, эллипсометра). По созданным программам должны

быть выращены структуры на СИН ВМА МЛЭ, по качеству идентичные структурам, выращенным с использованием в процессе роста аналитических приборов (масс-спектрометра, дифрактометра, эллипсометра).

После испытаний и доводки установка помещается в контейнер (рис. 6) для транспортировки по месту назначения в вакуумной или инертной среде.

НАЗЕМНАЯ ОТРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В соответствии с планом работ по проекту “Эпитаксия” ГНТП “Фундаментальные космические исследования” в 1996 году нами были проведены экспериментальные и теоретические исследования процессов формирования гетероэпитаксиальных полупроводниковых пленок германия и арсенида галлия методом молекулярно-лучевой эпитаксии на кремниевых подложках в наземных условиях. Исследовались изменения структурного совершенства полученных гетеросистем в зависимости от 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 скорости откачки и наличие стенок вакуумной камеры, на которых накапливаются осаждаемые материалы и неконтролируемым образом десорбируются, попадая на подложку в процессе получения слоев. Связанная с этим невозможность сочетания в одном вакуумном объеме процессов получения соединений A^3B^6 , A^2B^6 и элементов IV группы Периодической системы 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 вакуумных условий (суммарное давление остаточных газов 10^{-10} Па) 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 космос. При этом будет развит многолетний задел в создании трех поколений промышленно-ориентированного отечественного оборудования для МЛЭ и базовых технологий эпитаксии элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений. Решающую роль в выполнении проекта играет реализация уникального опыта в космическом материаловедении и изготовлении установок для выращивания объемных кристаллов в космосе (НИИ "Научный Центр"), а также в создании технологической оснастки, контрольно-измерительной аппаратуры, систем питания и всех бортовых средств автоматизации и телеметрии (ИЭС им. О.Е. 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.

В результате реализации проекта планируется создание орбитальной минифабрики по производству высокосовершенного альтернативного подложечного материала и многослойных гетеропереходов на основе полупроводниковых соединений типа A^4B^4 , A^3B^5 и A^2B^6 на кремниевых пластинах большого диаметра для нужд интегральной оптоэлектроники, микро- и нанoeлектроники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Валиев К.А., Орликовский А.А.* // Электроника: Наука, технология, бизнес. 1996. № 5–6. С. 3.
2. *Hueser J.E., Brock F.J.* // J. Vac. Sci. Technol. 1976. V. 13. № 3. P. 702.
3. *Melfi L.T., Outlaw R.A., Hueser J.E., Brock F.J.* // Ibid. P. 698.
4. *Ignatiev A.* // Earth Space Rev. 1995. V. 2. № 2. P. 10.
5. *News Briefs* // Compound Semiconductors. 1997. № 1. P. 11.
6. *Neu G., Teisserire M., Freundlich A. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. № 22. P. 334.
7. *Darvin J.* // Houston Busines Journ. Exclusive Reports. 2000. № 5. <http://houston.bcentral.com>
8. *Антропов В.Ю., Бирюков В.М., Бержатый В.И. и др.* Материалы второго российско-американского симп. по программе "Мир-НАСА", 1996. С. 144.
9. *Науманн Р.Дж.* Аэрокосмическая техника. 1987. № 10. С. 129.
10. *Гражулис В.А.* // Перспективные технологии. 1996. Т. 3. Вып. 21. С. 1.

Semiconductor Vacuum Technologies in Space: Hystory, State, Prospects

O. P. Pchelyakov, V. V. Blinov, A. I. Nikiforov, L. V. Sokolov, L. L. Zvorykin,
A. I. Ivanov, V. V. Teslenko, I. V. Churilo, A. A. Zagrebel'nyi

For multilayer semiconductor compositions, the prerequisites, implementation examples and perspectives of synthesis from molecular beams during orbital flight of space vehicles are considered. Advantages for fabrication of new thin film materials with unique properties are demonstrated for the technological process which are conducted in the high vacuum produced behind a wake shield facility. A ground-based imitator of the space module and an operating model of the wake shield facility are described. Specific Features of the draft design of a general-purpose automated MBE installation are discussed.