

Варианты космических систем для осуществления метода молекулярно-лучевой эпитаксии в космическом пространстве.

А.В. Ващенко

В работе рассматривается возможность осуществления метода молекулярно-лучевой эпитаксии в космическом пространстве с использованием таких космических систем, как МКС, КА «ФОТОН-М» и специализированный КА. Описываются преимущества и недостатки каждого из описанных вариантов.

Для получения высококачественных тонких пленок и многослойных структур используют чаще всего механизмы эпитаксиального роста материала пленки на соответствующей монокристаллической подложке. Наибольшее распространение получил метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), позволяющий формировать совершенные монокристаллические слои различных материалов в условиях сверхвысокого вакуума. Этот метод успешно применяется для выращивания тонких пленок полупроводников, металлов, диэлектриков, магнитных материалов, высокотемпературных сверхпроводников и многих других веществ

По сравнению с другими технологиями, используемых для выращивания тонких пленок и многослойных структур МЛЭ характеризуется, прежде всего малой скоростью роста и относительно низкой температурой роста. К достоинствам этого метода следует отнести возможность резкого прерывания и последующего возобновления поступления на поверхность подложки молекулярных пучков различных материалов, что наиболее важно для формирования многослойных структур с резкими границами между слоями. Получению совершенных эпитаксиальных структур способствует и возможность анализа структуры, состава и морфологии растущих слоев в процессе их формирования методом дифракции отраженных быстрых электронов и электронной спектроскопии. На рисунке 1 показана схема процесса молекулярно-лучевой эпитаксии.

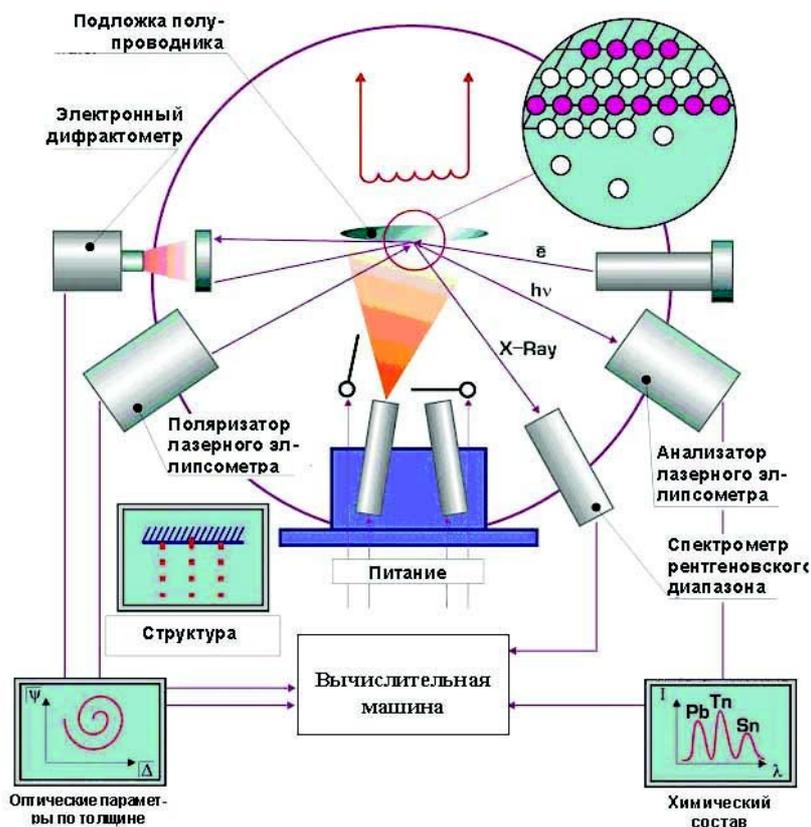


Рисунок 1. Схема процесса синтеза тонких пленок и многослойных полупроводниковых структур.

Синтез тонких пленок и многослойных структур методом МЛЭ требует создания уровня вакуума лучше, чем 10^{-6} - 10^{-8} Па в рабочей зоне для обеспечения выращивания эпитаксиальных плёнок без инородных примесей и нарушений структуры. Развитие наземных вакуумных технологий, требующих высоких уровней разрежения (не хуже 10^{-8} - 10^{-10} Па), сдерживается существенными техническими трудностями, связанными с необходимостью использования сложного вакуумного оборудования с длительным подготовительным циклом работы откачных устройств, а также с невозможностью обеспечения достаточной чистоты и воспроизводимости необходимого уровня глубокого разрежения в рабочих объёмах вакуумных установок. Другой недостаток наземных установок связан с тем, что стенки рабочих камер накапливают распыляемые материалы и являются их постоянным не контролируемым источником.

В то же время, в космических условиях в аэродинамическом следе за молекулярным защитным экраном (МЗЭ) возникают естественные области глубокого вакуума, уровень которого зависит от высоты орбиты. Эти области представляют собой новую технологическую высоковакуумную среду, использование которой приведёт к значительным улучшениям характеристик полупроводниковых структур.

Основные факторы космического пространства, влияющие на процесс МЛЭ:

- глубокий вакуум и практически полное отсутствие O_2 и углеродсодержащих компонент в технологической зоне за МЗЭ;
- близкие к предельным скорость и производительность откачки компонент рабочего молекулярного пучка;
- практически полное отсутствие стенок рабочей камеры;
- возможность значительного увеличения расстояния от подложки до источника молекулярного пучка.
- улучшение стабильности условий роста за счет ослабления возмущающего действия гравитации позволяет улучшить однородность электрофизических параметров;

Рассматриваются возможные варианты космических систем первоначально для проведения исследований, а в перспективе для развертывания орбитальной мини-фабрики по производству высококачественных полупроводниковых материалов.

Использование МКС

Предусматривается размещение технологической установки и молекулярного экрана с помощью выносного устройства на одном из модулей или одной из ферм МКС использование транспортной системы МКС для доставки технологического оборудования на орбиту и возвращения результатов экспериментов на Землю, а также участие экипажа в монтаже и обслуживании оборудования на внешней поверхности МКС.

Предполагается выполнять компоновку по блочному типу, и в состав блоков будут входить следующие системы и узлы:

- молекулярный экран с посадочными местами для технологической установки МЛЭ, а также для контрольно-измерительной аппаратуры и датчиков. Защитный экран представляет собой раскрывающуюся конструкцию.
- технологическая установка, монтируемая на внутренней по отношению к набегающему потоку стороне защитного экрана, для выращивания полупроводниковых структур по методу МЛЭ в технологической зоне высокого вакуума в ближнем аэродинамическом следе за молекулярным экраном.
- посадочное поворотное устройство с местами для монтажа защитного экрана с сборке с технологической установкой. Это устройство обеспечивает при проведении космического эксперимента ориентацию экран в положение, при котором происходит его поперечное обтекание невозмущенным набегающим потоком, или в положение, исключающее попадание в технологическую зону потоков массы загрязняющих веществ от внешних поверхностей космического объекта в режиме ожидания.

- выносное устройство с посадочными местами для установки на нем поворотного устройства в сборке с экраном, а также для монтажа всей установки на космическом объекте. Выносное устройство представляет собой раздвижную ферменную конструкцию, длина которой определяется условием гарантированного выноса экрана в невозмущенный набегающий поток. На этом устройстве предусматриваются места крепления силовой и телеметрической кабельной сети.

- блок управления, предназначенный для управления режимами работы систем и узлов аппаратуры технологической установки, контрольно-датчиковой аппаратуры, а также для сбора, первичной обработки, сжатия и передачи информации, получаемой в ходе экспериментов.

- контрольно-измерительная аппаратура для регистрации параметров набегающего потока и среды в зоне высокого вакуума за защитным экраном, а также для контроля параметров рабочих режимов систем и узлов технологической установки.

- кабельная сеть для подключения аппаратуры к системам электропитания и телеметрии.

В состав технологической установки входит: кассетный магазин с приводом смены подложек и нагревателем; блок молекулярных источников осаждаемых веществ с подвижными заслонками; экранирующее устройство, защищающее блок молекулярных источников от технологической зоны; аппаратура, регистрирующая параметры рабочих режимов; источники электропитания узлов установки; герметичный защитный кожух для транспортировки установки.

Регистрирующая аппаратура технологической установки контролирует температуру подложки при очистке ее поверхности и при формировании эпитаксиальной структуры; температуру испарительных ячеек и рабочего фланца; интенсивность молекулярных пучков; химический состав фоновой атмосферы и уровень вакуума в установке; номера функционирующих источников молекулярного пучка; положение заслонки на молекулярных источниках; номер обрабатываемой подложки; картину дифракции электронов на поверхности подложки; состояние, фазу выполнения, длительность технологического процесса.

В состав регистрирующей аппаратуры технологической установки входят температурные датчики, вакуумные манометры, масс-спектрометры, датчики положения заслонок испарительных ячеек, спектрометр, телекамера дифрактометра быстрых электронов.

Используемая при проведении процесса контрольно-измерительная и датчиковая аппаратура в составе экрана необходима для регистрации параметров набегающего потока, уровня вакуума и состава газовой среды (нейтральные частицы и ионы) в ближнем аэродинамическом следе за экраном.

Данная установка представляет из себя сборный механизм. Сборка осуществляется на орбите, космонавтами в открытом космосе.

При использовании международной космической станции для реализации проекта получения полупроводниковых материалов возникают следующие трудности:

- наличие собственной атмосферы (десорбция и диффузия газов и паров, адсорбированных и абсорбированных материалами внешних покрытий, деструкция и испарение материалов внешних покрытий, утечка газов из гермоотсеков). По расчетным оценкам давление газовой фазы собственной воздушной атмосферы значительно превышает уровень фонового давления на этой высоте орбиты до одного – двух порядков. Это приводит к тому, что для осуществления технологического процесса необходимо выносное устройство и дополнительный подъем орбиты станции. При динамических операциях, когда работают двигательные установки, давление СВА резко возрастает на 2-4 порядка по сравнению с фоновыми условиями, а затем возвращается к исходному значению. По этой причине необходимо избегать возможных совпадений времени технологического процесса и времени работы ДУ, что крайне сложно и приводит к значительному увеличению времени производства всей партии пластин;

- воздействие остаточных ускорений (микрогравитация). Во время полетов орбитального корабля «Фотон» и станции «Мир» был выполнен ряд экспериментов по выращиванию кристаллов, в которых наблюдалась значительная сегрегация легирующих примесей. Сопоставление результатов изучения макронеоднородностей в условиях космического полёта с имеющимися данными о микрогравитационных условиях на космических аппаратах позволило проследить прямую связь между медленно меняющимися по величине и направлению остаточными ускорениями и характером распределения легирующих примесей в монокристаллах. Результаты показывали, что есть повод для беспокойства даже в случае малых значений остаточных ускорений;

- возможность затенения основных солнечных батарей;
- значительные трудности с развертыванием станции и распределением грузопотока на неё;

- проведение экспериментов на МКС, а тем более серийное производство, зависит от технических, организационных и политических факторов развертывания и эксплуатации станции.

Вывод: данный вариант интересен для проведения экспериментов и возможной отработки технологического процесса, а также возможен для получения единичных заказных пластин. Однако для серийного производства полупроводниковых пластин (создание орбитальной минифабрики) он не подходит.

Использованием космического корабля «Фотон»

Предусматривается использование космического корабля типа «Фотон» для доставки технологического оборудования на орбиту, проведения технологического процесса и возвращения результатов экспериментов на Землю.

Вся установка располагается на внешней поверхности космического корабля. При подъеме на заданную орбиту предлагается вынос, с помощью выносного устройства, экрана и технологической установки за пределы грузового отсека на некоторое расстояние и раскрытие экрана.

Предполагается выполнять компоновку по блочному типу, в состав блоков входят элементы аналогичные схеме использования на МКС. Отличия заключаются в том, что данная установка представляет из себя механизм позволяющий в автоматическом режиме осуществлять подачу материалов к технологической установке и возврат материалов в грузовой отсек.

При использовании космического корабля типа «Фотон» для реализации проекта получения полупроводниковых материалов возникают следующие трудности:

- наличие собственной атмосферы (десорбция и диффузия газов и паров, адсорбированных и абсорбированных материалами внешних покрытий, деструкция и испарение материалов внешних покрытий, утечка газов из гермоотсеков).
- требуется нахождение на орбите продолжительное время до года («Фотон-М» может находиться на орбите до 30 суток);
- воздействие остаточных ускорений (микрогравитация). Уровень микрогравитации на борту космического корабля составляет 10^{-5} - 10^{-6} g. Это значительно ниже значений микрогравитации на МКС, но эти значения достаточно велики для осуществления процессов МЛЭ;

Вывод: данный вариант возможен для проведения экспериментов и возможной обработки технологического процесса, а также возможен для получения единичных заказных пластин или мелкосерийного производства. Однако для серийного производства полупроводниковых пластин он не подходит.

Использование специализированного малого КА

Ракетно-космический комплекс для получения в космосе полупроводниковых материалов методом молекулярно-лучевой эпитаксии включает:

- ракету-носитель легкого класса РН,
- разгонный блок РБ,

– специализированный космический аппарат.

Специализированный малый КА должен обеспечивать переход с круговой опорной орбиты высотой 200 км на круговую орбиту высотой 600-650 км и функционирование технологического оборудования на орбите в требуемых условиях и в течение заданного периода времени с последующим возвращением на Землю полезного груза. КА включает, помимо служебных систем, технологическую установку (ТУ) с молекулярным защитным экраном и возвращаемую капсулу.

Специализированный КА выводится на опорную орбиту с помощью РН и РБ. После отделения от РБ в течение 2-х месяцев бортовая ЭРДУ переводит КА на рабочую орбиту, после чего он совершает автономный полет длительностью до 1 года. По окончании работы технологического оборудования КА ориентируется в пространстве для выдачи корректирующего импульса. Импульс выдается с помощью специального тормозного двигателя. Затем производится отделение возвращаемой капсулы (ВК). ВК совершает спуск в атмосфере и мягкую посадку в зоне действия поисковых служб.

Конструктивно-компоновочная схема КА предусматривает расположение служебных систем и ВК с противоположной по отношению к ТУ стороны молекулярного защитного экрана. Благодаря этому напыляемые поверхности образцов материалов обращены в открытый космос, а одиночные микрочастицы от элементов конструкции КА не попадают в рабочую зону ТУ. В орбитальном полете КА ориентирован осью $-X$ по направлению вектора орбитальной скорости. Таким образом достигается положение ТУ за МЗЭ. Экран имеет диаметр около 2 м. Полуфабрикаты и готовые образцы материалов на этапе транспортировки хранятся в специальном герметичном контейнере в ВК. Внутри контейнера поддерживается атмосфера инертного газа или вакуум. В процессе работы ТУ кассеты с образцами подаются из транспортировочного контейнера в рабочую зону ТУ. После обработки образцы возвращаются в контейнер ВК для последующего спуска на Землю.

Высота рабочей орбиты определяется исходя из требований степени вакуума 10^{-8} – 10^{-10} Па в рабочей зоне ТУ. В результате проведенных оценок получено, что без МЗЭ необходимый вакуум достигается на высотах от 400 до 600 км в зависимости от уровня солнечной активности и размера МЗЭ.

После завершения работы технологического оборудования КА переводится в пространственное положение для выдачи корректирующего импульса. Импульс выдается с помощью специального твердотопливного двигателя. Затем происходит отделение возвращаемой капсулы, которая совершает баллистический спуск в атмосфере и мягкую посадку в заданном районе.

К конструкции КА кроме обычных технических требований к космическому аппарату, предъявляются требования по уменьшению собственной атмосферы. В связи с этим

необходимо ограничить применение газовыделяющих материалов: смазок, клеев, красок и других неметаллических материалов. Внешние поверхности конструкции КА должны быть соответствующим образом обработаны (отполированы) для уменьшения газовой выделенности. Дренажи и выбросы вещества при работе систем исключаются.

Технологическое оборудование, устанавливаемое на КА, включает следующие основные элементы:

1. Технологическая установка МЛЭ, предназначенная для выращивания сверхтонких полупроводниковых структур по методу МЛЭ. Предполагается, что в состав технологической установки будут входить: блок молекулярных источников осаждаемых веществ с подвижными заслонками и резистивными нагревателями тиглей, дифрактометр быстрых электронов с электронной пушкой и люминесцентным экраном, экранирующее устройство, защищающее блок молекулярных источников от технологической зоны, аппаратура, регистрирующая параметры рабочих режимов, герметичный защитный кожух для транспортировки установки. Наземный прототип бортовой ТУ показан на рисунке 2.

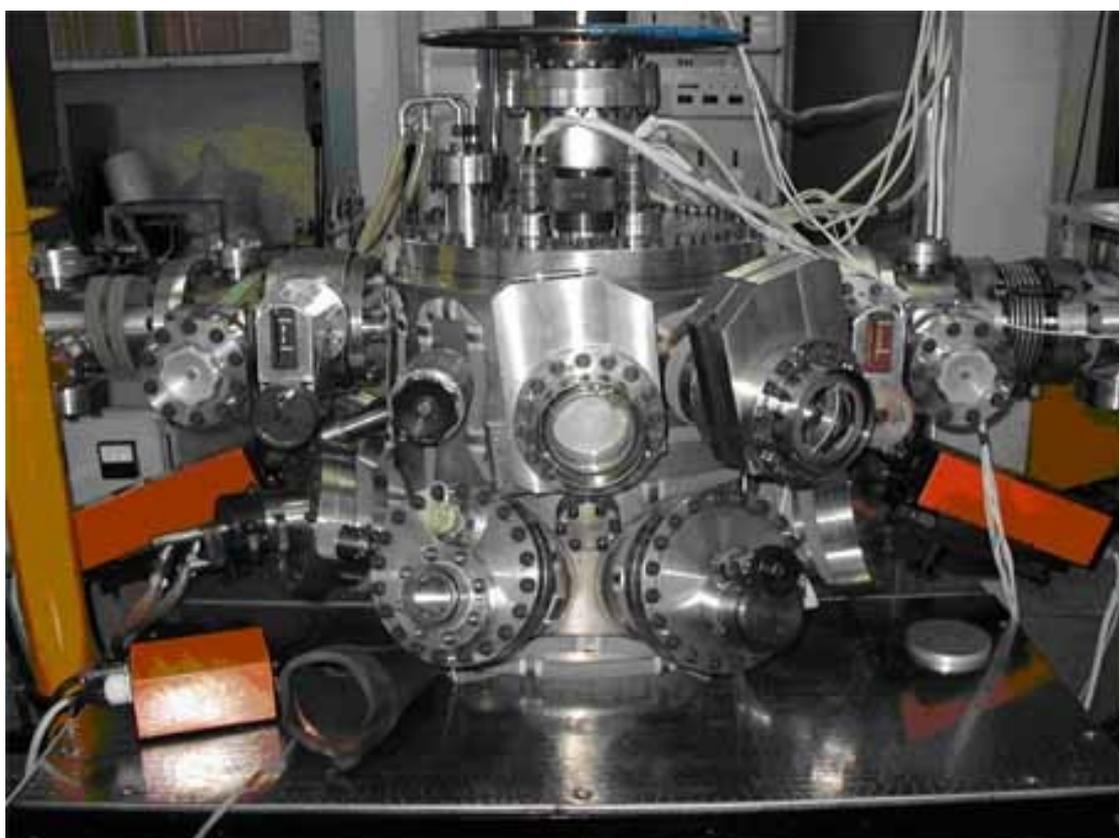


Рисунок 2. Наземная технологическая установка МЛЭ.

Вакуумно-механическая аппаратура (ВМА) МЛЭ предназначена для выращивания полупроводниковых структур в условиях высоковакуумной зоны за МЗЭ и должна обеспечивать:

- смену полупроводниковой подложки в рабочей зоне установки;

- равномерный нагрев полупроводниковой подложки для очистки поверхности и проведения процесса роста;

- генерирование молекулярных пучков, обеспечивающих выращивание Si, Ge, GaAs;

- управление интенсивностью молекулярных пучков.

Регистрирующая аппаратура технологической установки должна контролировать температуру подложки при очистке её поверхности и при формировании эпитаксиальной структуры, температуру испарительных ячеек и рабочего фланца, интенсивность молекулярных пучков, химический состав фоновой атмосферы и уровень вакуума в установке, номера функционирующих источников молекулярного пучка, положение заслонки на молекулярных источниках, номер обрабатываемой подложки, картину дифракции электронов на поверхности подложки, состояние, фазу выполнения, длительность технологического процесса и т.д. В состав регистрирующей аппаратуры технологической установки должны входить температурные датчики, вакуумные манометры, масс-спектрометры, датчики положения заслонок испарительных ячеек, спектрометр, телекамера дифрактометра быстрых электронов.

2. Контрольно-измерительная и датчиковая аппаратура в составе МЗЭ необходимы при проведении космических экспериментов для регистрации параметров набегающего потока, уровня вакуума и состава газовой среды (нейтральные частицы и ионы) в ближнем аэродинамическом следе за экраном, температурных режимов и уровней электростатических зарядов на поверхностях экрана, а также наличия дисперсных частиц в вакуумной зоне. В состав контрольно-измерительной аппаратуры должны входить: измерители величины потока набегающих газовых частиц верхней атмосферы на высоте орбиты, вакуумные манометры, масс-спектрометры, температурные датчики, датчики электрического потенциала, датчики дисперсных частиц.

3. Механизм подачи кассет с необработанными подложками из транспортировочного контейнера капсулы в рабочую зону установки и загрузки кассеты с выращенными полупроводниковыми структурами из рабочей зоны в транспортировочный контейнер капсулы.

4. Аппаратура измерения уровня вакуума (АИУВ), предназначенная для измерения уровня вакуума в технологической зоне за МЗЭ, подтверждения эффективности термического обезгаживания МЗЭ и регистрации уровней вакуума при изменении режима полёта, а также для контроля параметров систем и узлов технологической установки. АИУВ должна включать в себя масс-спектрометр и датчики давления.

5. Блок управления режимами (БУР), предназначенный для управления режимами работы систем и узлов КА и управления процессом МЛЭ, БУР должен обеспечивать вы-

дачу управляющих сигналов в аппаратуру электропитания узлов ВМА для их надёжного функционирования в соответствии с циклограммой процесса и показаниями контрольно-измерительной и датчиковой аппаратуры, а также для сбора, первичной обработки, сжатия и передачи информации с КА на наземный пункт приёма информации.

6. Блок питания, предназначенный для электропитания АИУВ и узлов ВМА. а также кабельная сеть для подключения аппаратуры к системам электропитания и телеметрии, а также источники электропитания узлов установки.

Схема технологической установки приведена на рис. 2.10.

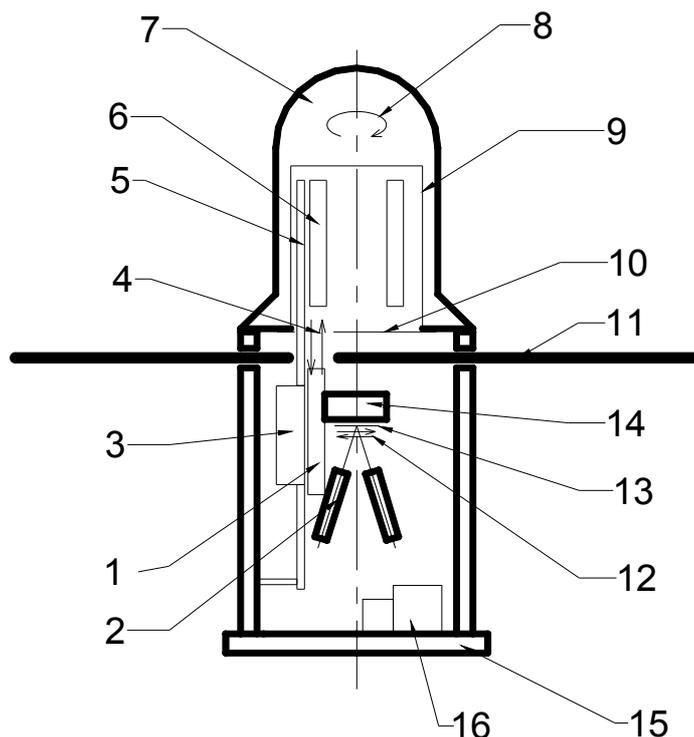


Рис. 2.10. Схема технологической установки.

1 – кассета с подложками в рабочем положении; 2 – эмиттер; 3 – привод механизма подачи кассеты; 4 – направление подачи кассеты; 5 – направляющая механизма подачи кассеты; 6 – кассета с подложками в транспортном положении; 7 – возвращаемая капсула; 8 – направление вращения транспортного контейнера с кассетами; 9 – транспортный контейнер с кассетами; 10 – донная крышка; 11 – молекулярный защитный экран; 12 – направление подачи подложки; 13 – подложка с образцом; 14 – механизм подачи подложки; 15 – опорная конструкция; 16 – блоки управления и питания.

Общая последовательность операций технологической установки состоит в следующем. По команде от системы управления на нагреватели ячеек Кнудсена эмиттера подаётся напряжение, и они разогреваются до уровня дежурного режима, в котором находятся до окончания обработки всей партии подложек. Из капсулы с помощью магнитного манипулятора подложка подаётся в реактор и устанавливается на нагревательном рабочем

столике. Включаются подогрев и вращение столика, с помощью электронной пушки производится финишная очистка поверхности подложки. После очистки поверхности (5 – 10 мин) источник электронов отключается и подложка готова для наращивания молекулярных слоёв.

На испарительные ячейки, содержащие необходимые для формирования полупроводниковых слоёв заданного состава компоненты, подаётся рабочее напряжение, ячейки разогреваются до заданной температуры, в их объёме создаётся заданное давление пара. Открывая в программируемой последовательности на определённое время те или иные испарительные каналы ячеек Кнудсена, формируют заданную последовательность осаждения полупроводниковых слоёв, отличающихся толщиной и составом, а, следовательно, и электронными свойствами.

По окончании процесса наращивания испарительные каналы перекрываются, а сами ячейки переводятся в дежурный режим, нагреватель столика отключается. Подложка с выращенной структурой переносится обратно в кассету, и цикл наращивания повторяется на очередной подложке.

Полуфабрикат (исходные полупроводниковые подложки) также как и полученная продукция (подложки с выращенным слоем) должны храниться в транспортировочном контейнере капсулы в атмосфере сухого инертного газа или азота при давлении $1,2 \cdot 10^5 \pm 0,4 \cdot 10^5$ Па и температуре $25 \pm 15^\circ$ С или в вакууме.

Вывод: данный вариант наиболее подходящий для осуществления серийного производства (создание орбитальной мини фабрики), поскольку обеспечивает наиболее высокую степень вакуума за молекулярным экраном и наименьшим уровнем микрогравитации - не более 10^{-6} g. Также осуществление этого варианта не зависит от технических, организационных и политических факторов, таких как развертывания и эксплуатации и распределение грузопотока на станцию МКС.

Список используемой литературы:

1. Л. Ченг, К. Плог. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры.: Пер. с англ. – Москва: Мир, 1989 – 584 с.
2. Чистяков Ю.Д., Райнова Ю.П. Физико-химические основы технологии микроэлектроники. – Москва.: Металлургия, 1979 - 253 с.
3. О.П. Пчеляков, В.В. Блинов, А.И. Никифоров, Л.В. Соколов, Л.Л. Зворькин, А.И. Иванов, В.В. Тесленко..// Полупроводниковые вакуумные технологии в космическом пространстве. – Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования, 2001, №9 с.70-85.
4. Ващенко А.В. Влияние возмущающих аэродинамических сил на эволюцию орбиты космического аппарата // Электронный журнал «Труды МАИ», вып. 26.- <http://www.mai.ru>
5. Гушин В.Н. Основы устройства космических аппаратов. М.:Машиностроение, 2003.-272 с.

Сведения об авторе:

Ващенко Алексей Викторович, аспирант кафедры космические системы и ракетостроение Московского авиационного института (государственного технического университета); e-mail: AlekseyVash@yandex.ru