

## **Применение метода молекулярно-лучевой эпитаксии для получения тонких пленок и многослойных структур в космическом пространстве.**

*А.В. Ващенко*

*В работе рассматривается возможность применения метода молекулярно-лучевой эпитаксии для получения тонких пленок и многослойных полупроводниковых структур в космическом пространстве. Описываются основные преимущества применения данного метода в космическом пространстве. Также в работе представлен имеющийся на настоящий момент опыт применения данного метода на наземных и космических установках.*

Космические полеты на околоземных орбитах представляют уникальную возможность для деятельности в условиях невесомости (микрогравитации), вакуума околоземного космического пространства, ионизирующих излучений в окрестностях Земли. Именно эта деятельность является центральной в программе орбитальных полетов и в направлении «космическая технология». К настоящему времени космическая технология прочно заняла одно из направлений коммерческого использования космоса наряду с космической связью и наблюдением Земли. Известно, что для производства материалов космос привлекателен специфическими условиями невесомости и вакуума. Сегодня не вызывает сомнения в целесообразности дальнейшего развития исследований в этой области как фундаментальных, так и направленных на практические цели. Полученные в космосе результаты используются для совершенствования наземных технологий, а также в подготовке к организации промышленного производства некоторых материалов в космосе.

Работы в области космической технологии материалов приобрели широкое распространение в мире. США, Западная Европа и Япония через государственные космические агентства NASA, ESA и NASDA выделяют из бюджетов миллиарды долларов ежегодно на проведение работ в этой области, в том числе на создание специализированных космических объектов. Ожидается, что успех космических исследований в этой области определит в будущем общий уровень современной техники.

Потребителями результатов космической технологии являются различные научные и медицинские организации, металлургия, микроэлектронная промышленность, медико-биологическое и пищевое производства, а также многие другие. Кроме того, перенесение ряда производств в космос целесообразно с точки зрения экологии. Существует большая заинтересованность зарубежных стран и отдельных компаний в использовании космических средств для технологии материалов.

К числу наиболее перспективных технологических процессов относятся рост кристаллов полупроводников из расплавов, парагазовой фазы и методом молекулярно-лучевой эпитаксии,

электродепозиция, затвердевание металлов, сплавов, эвтектик и композитов, ионообменная диффузия стекол, рост кристаллов из водных растворов, в том числе органических, электрофорез и другие.

Технологические эксперименты в области космического полупроводникового материаловедения, выполненные к настоящему времени в России и за рубежом, показали ряд преимуществ получения в условиях невесомости полупроводниковых кристаллов и эпитаксиальных структур, используемых в микроэлектронике:

- наиболее существенным положительным эффектом является возможность устранения характерной для выращиваемых на Земле кристаллов полосчатой неоднородности в распределении примесей, что увеличило выход годных приборов с 1-5% до 50 – 80% - для арсенид – галлиевых элементов;

- улучшение стабильности условий роста за счет ослабления возмущающего и дестабилизирующего воздействия конвекции позволяет улучшить однородность электрофизических параметров и воспроизводимость свойств материалов, что также приводит к увеличению выхода годных кристаллов без существенных дополнительных затрат;

- при выращивании кристаллов в условиях невесомости достигается более высокая степень структурного совершенства и чистоты материала благодаря возможности роста при ограниченном контакте или без контакта со стенками контейнера, что позволяет существенно улучшить качество полупроводников и создать на их основе приборы со значительно улучшенными характеристиками, а также новые классы полупроводниковых приборов.

Эксперименты по росту кристаллов на орбитальном комплексе «Мир» до июня 1990 года проводились в базовом блоке станции на установках «Корунд-1М» и «Галлар». В этот период была выполнена серия экспериментов по выращиванию локальных эпитаксиальных структур кремния с дальнейшим разращиванием на диэлектрике. Сравнительная оценка однородности толщины и удельного сопротивления, показала, что неоднородность удельного сопротивления снизилась с  $\pm 20\%$  для образцов, полученных на Земле, практически до 0% для образцов, полученных в космосе. Разброс толщины соответственно с 10% до 2-х и менее процентов. Плотность дефектов снизилась на два порядка – до  $2 \times 10^2 \text{ см}^{-2}$ .

#### Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

Суть метода составляет выращивание в сверхвысоком вакууме при помощи молекулярных/атомарных пучков, направленных на поверхность полупроводниковой пластины-подложки, монокристаллических тонких пленок и многослойных структур, состоящих из разнообразных химических соединений и твердых растворов с полупроводниковыми, металлическими или изолирующими свойствами. Выращивание производится путем нанесения тонких пленок этих мате-

риалов с помощью молекулярных и атомных пучков в сверхвысоком вакууме на поверхность полупроводниковой пластины при строгом контроле состава, структуры и толщины каждого слоя в процессе его нанесения. Высокая температура подложки способствует миграции атомов по поверхности, в результате которой атомы занимают строго определенные положения. Этим определяется ориентированный рост кристалла формируемой пленки на подложке. Такие системы, выращенные на поверхности полупроводниковых пластин используются как исходный материал для изготовления многих приборов, интегральных схем и устройств микро- и оптоэлектроники. Метод МЛЭ в сочетании с современными методами литографии для формирования "рисунка" микросхем (и по аналогии - "наносхем") позволяет перейти от микронных толщин слоев и линейных размеров отдельных элементов к нанометровым. Вместе с этим происходит качественный прорыв нанoeлектроники в крайне высокочастотный диапазон работы передающих и приемных устройств, и к сверхминиатюрным схемам электронной памяти большой плотности. Однако в наземных технологиях существуют препятствия на пути уменьшения размеров и увеличения числа элементов в интегральных схемах. Если в ходе технологического процесса в окружающем пластину пространстве существуют посторонние частицы, размеры которых превышают величину элементов, то при попадании на поверхность схемы такие частицы при нанесении следующих слоев замыкают электроды или превращаются в неустраняемые дефекты. Современные производственные линии располагают в специальных чистых помещениях, которые по классу чистоты так и характеризуются — количеством пылинок, попадающих на поверхность квадратного дюйма за час. В помещениях класса "10" или даже "1" рабочие могут находиться только в специальных "скафандрах", чтобы не стать источниками опасной пыли. При получении более плотноупакованных структур резко растут требования к глубине вакуума и чистоте жидких и газообразных сред, окружающих полупроводниковые пластины в процессе их обработки. Эти требования и, как следствие, — стоимость производства — становятся непомерными. Стоимость современных установок для получения и использования сверхвысокого вакуума достигает величин в миллионы долларов. А эксплуатация этих систем обходится тем дороже, чем более глубоким является получаемый вакуум, чем больше расходуется энергии, а также жидких гелия и азота для его получения. Подобный рост себестоимости производства становится «не по карману». На рис. 1 показана наземная установка, установленная в ИФП СО РАН (г. Новосибирск), которая используется для разработки эпитаксиальной технологии в наземных условиях и для серийного производства структур с целью приборного применения. Технические характеристики комплекса приведены в таблице 1.

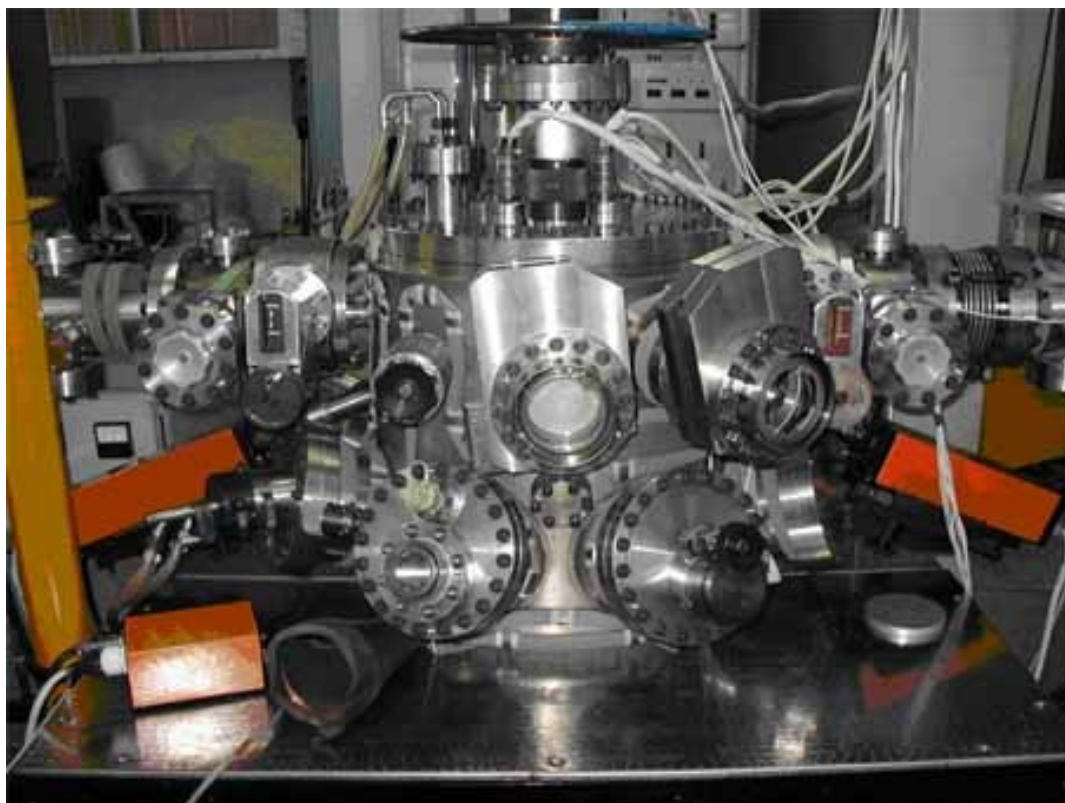


Рисунок 1. Наземная установка для разработки эпитаксиальной технологии, установленная в ИФП СО РАН (г. Новосибирск)

Таблица 1

	Характеристики	Размерность	Значения
1	Предельный вакуум в модулях подготовки и анализа подложек, эпитаксии полупроводниковых соединений, эпитаксии элементарных полупроводниковых металлов и диэлектриков и в модуле загрузки и выгрузки подложек	Па	$10^{-8}$ $10^{-6}$
2	Максимальный диаметр подложек	мм	102
3	Максимальная частота вращения	об/мин	30
4	Число одновременно загружаемых подложек в два модуля загрузки и выгрузки подложек: - диаметром 40мм - диаметром 102мм		120 40
5	Количество источников молекулярных пучков: тигельных в камере эпитаксии полупроводниковых соединений тигельных в камере эпитаксии элементарных полупроводниковых металлов и диэлектриков электронно-лучевых		8 2
6	Максимальная температура подложек	°К	1400
7	Точность поддержания температуры подложек	°К	$\pm 0,5$
8	Максимальная температура тигельных источников	°К	1500
9	Точность поддержания температуры тигельных источников	°К	$\pm 0,5$
10	Количество выращиваемых структур с пленкой толщиной 1мкм за день (18 ч) на подложках диаметром 102мм диаметром 40мм		18 54
11	Расход жидкого азота в процессе выращивания эпитаксиальных структур	л/сут	100

Другим серьёзным недостатком наземных установок является их ориентация на выращивание плёнок узкого круга материалов. Чтобы не происходило загрязнение эпитаксиальных гетероструктур, при поочередном синтезе разнородных полупроводниковых соединений требуется использовать разные ростовые камеры для каждого из них. Это связано с тем, что стенки рабочих камер накапливают распыляемые материалы и являются их постоянным не контролируемым источником.

При реализации процесса МЛЭ в наземных вакуумных установках факторами, лимитирующими получение высококачественных структур, являются глубина и чистота вакуума, производительность откачной системы, а также наличие стенок вакуумной камеры, накапливающих и отдающих компоненты молекулярных пучков и атмосферы остаточных газов, загрязняющих подложку и пленку. Учитывая техническую сложность и высокие затраты, связанные с преодолением этих факторов, а также перспективность получения эпитаксиальных структур при глубине вакуума  $10^{-11} \dots 10^{-12}$  Па, не достижимой в обозримом будущем на Земле, вполне естественен интерес к переносу установок молекулярно-лучевой эпитаксии в открытый космос.

Идея использования молекулярного экрана для получения ультравысокого вакуума в космосе на низких орбитах принадлежит американским ученым. В 1976 году Л.Мелфи с соавторами провел теоретический анализ состояния газовой среды вокруг летящего в пространстве полусферического экрана и сформулировал концепцию орбитальной лаборатории со сверхразреженной средой. Эта работа проводилась при поддержке НАСА. Расчеты авторов показали, что если в космическом пространстве на высоте 200 - 600 км будет с первой космической скоростью двигаться экран — полированный диск из нержавеющей стали, то в его кильватерной области образуется конусный след практически лишенный вещества (рис.2).

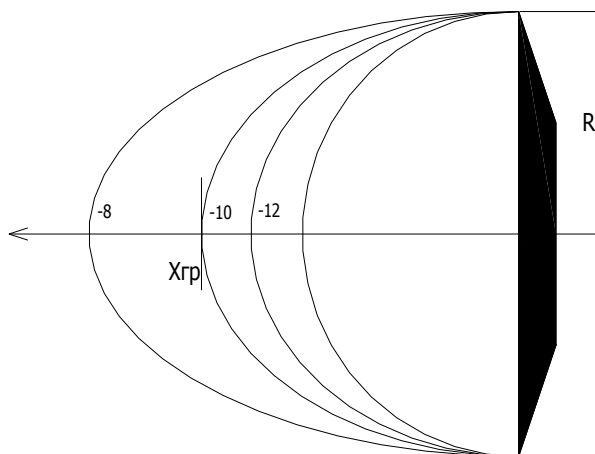


Рисунок 2. Конусный след за молекулярным экраном

С помощью молекулярного экрана можно получить такое разрежение, что появление одного атома кислорода (кислород - основной компонент газовой среды на высоте орбитального полета космических станций) на площадке в один квадратный дециметр придется ожидать миллион лет.

Все давление за экраном будет определяться атомами гелия и водорода, источником которых является Солнце, а также веществом, испаряющимся с поверхности самого экрана. Для сравнения следует отметить, что в наземных сверхвысоковакуумных технологических установках с криогенными насосами достигается предельное разрежение в сотни и тысячи раз хуже, чем было практически получено в первых американских космических экспериментах с молекулярным экраном.

Области глубокого вакуума представляют собой новую технологическую высоковакуумную среду, использование которой приведёт к значительным улучшениям характеристик полупроводниковых материалов. Ростовая установка, расположенная в космосе за МЗЭ, не имеет стенок. Поэтому реализация технологии МЛЭ в условиях космического вакуума, позволяет контролируемо осаждать на поверхности подложки различные материалы (сверхпроводники, полупроводники, диэлектрики, металлы) в едином технологическом цикле и в условиях более высокого вакуума.

Основные факторы космического пространства, влияющие на процесс МЛЭ:

- глубокий вакуум и практически полное отсутствие  $O_2$  и углеродсодержащих компонент в технологической зоне за МЗЭ. Полученные в таких условиях эпитаксиальные слои могут обладать рекордными характеристиками по чистоте и концентрации центров безизлучательной рекомбинации. Это было экспериментально показано на образцах материалов, выращенных в 1996 г. в ходе космического полёта КА WFS-3;

- близкие к предельным скорость и производительность откачки компонент рабочего молекулярного пучка, создающие уникальную возможность для сверхбыстрой смены химического состава газовой фазы в зоне роста на поверхности подложки, что позволяет получать гетеропереходы с идеально резкими профилями;

- практически полное отсутствие стенок рабочей камеры и возможность существенного уменьшения суммарной поверхности элементов технологической оснастки в зоне роста. Это позволяет устранить накопление ранее распыленных веществ и их неконтролируемый перенос на подложку при последующем росте других материалов и сочетать получение разнородных материалов без традиционного переноса подложки из одной ростовой камеры в другую. Кроме того, появляется возможность увеличить количество независимых индивидуальных источников молекулярных пучков и получать сверхрезкие гетеропереходы и границы раздела между эпитаксиальными слоями, а также формировать многослойные структуры, содержащие большое число разных по составу слоёв;

- возможность значительного увеличения расстояния от подложки до источника молекулярного пучка. Благодаря этому происходит более равномерное осаждение молекулярных пучков, что приводит к улучшению однородности состава и толщины плёнок по площади подложки, а также к увеличению их диаметра;

- улучшение стабильности условий роста за счет ослабления возмущающего действия гравитации позволяет улучшить однородность электрофизических параметров;

- возможность использования токсичных летучих жидкостей и газов в качестве исходных материалов для синтеза плёнок без загрязнения окружающей среды. Эти соединения быстро рассеиваются до безопасных концентраций и легко разлагаются на безопасные компоненты под действием солнечного ионизирующего излучения.

Работы по американскому проекту молекулярно-лучевой эпитаксии за молекулярным экраном были инициированы в 1989 году Центром эпитаксии в космическом вакууме (Университет Хьюстона). Работы по проекту велись как в направлении разработки наземных технологий и установок, так и в части разработки технологических экспериментов в околоземном космосе. В рамках этого проекта были созданы космический аппарат WSF и комплекс технологического оборудования для проведения экспериментов по МЛЭ в космосе. На рисунке 3 показан общий вид установки WSF.



Рис. 3. Общий вид установки WSF.

Запуски этого КА проводились в 1994, 1995 и 1996 годах в ходе полетов МТКК «Спейс Шаттл». Полеты WSF показали возможность производства высококачественных тонкопленочных материалов в космосе и помогли ускорить усовершенствование наземных тонкопленочных технологий.

В настоящее время работы Центра ведутся по направлениям: создания инфракрасных лазеров для зондирования атмосферы, нового поколения солнечных батарей для космических станций и спутников, керамических оптических микродетекторов, флуоресцентных микросенсоров, электрически переключаемых оксидных резисторных элементов. Результаты проведенных работ нашли применение в технике связи, микроэлектронике (в частности, при разработке полупроводниковых лазеров и высокоскоростных транзисторов). Полученные Центром полупроводниковые материалы (соединения фотоэлектронных ячеек с двойными и тройными переходами на основе системы InP)

позволили создать элементы солнечных батарей с эффективностью, приближающейся к 40%, и с повышенной радиационной стойкостью.

В 1996 году в рамках проекта «Экран» отечественной кооперацией в составе РКК «Энергия», НИИ «Научный центр», ИФП СО РАН были начаты практические работы по созданию космических установок и защитного экрана для проведения экспериментов по МЛЭ в космосе. Установку планировалось разместить на станции «Мир», но в связи с прекращением эксплуатации станции эксперимент предложено осуществить на МКС. В настоящее время проект «Экран-М», предусматривающий проведение экспериментов на МКС по синтезу полупроводниковых многослойных материалов в космическом пространстве за молекулярным экраном, включен в перечень проектов утвержденной программы научно-прикладных исследований на российском сегменте Международной космической станции. В отличие от американского проекта, ориентированного на применение в качестве подложек пластин арсенида галлия, в основе Российской программы лежит использование более дешевого (в 10--15 раз) и более легкого (в 2,3 раза) подложечного материала большой площади (пластины кремния диаметром до 200 мм). Получение буферного слоя арсенида галлия предполагается проводить непосредственно перед синтезом приборных структур. Ориентация на реализацию этого проекта на российском сегменте МКС изначально сопряжено с большим риском вследствие значительной собственной внешней атмосферы станции, «спрятаться» от которой за молекулярным экраном, скорее всего, не удастся из-за наличия источников СВА на модулях станции.

#### **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. Зворыкин, А.И. Иванов, В.В. Тесленко. Полупроводниковые вакуумные технологии в космическом пространстве. – Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования, 2001, №9 с.70-85.

---

#### *Сведения об авторах:*

*Ващенко Алексей Викторович, аспирант кафедры «Космические системы и ракетостроение» Московского авиационного института (государственного технического университета); e-mail: [AlekseyVash@yandex.ru](mailto:AlekseyVash@yandex.ru)*