

I. Введение

В данном пособии кратко излагаются основные идеи и методы эпитаксиального выращивания полупроводниковых гетероструктур. Этим вопросам посвящена часть спецкурса «Физика и технология эпитаксиальных систем», читаемого студентам магистратуры. Другие вопросы, рассматриваемые в этом спецкурсе и связанные с характеристикой гетероструктур, излагаются в отдельном пособии «Новые микроскопические методы характеристики гетероструктур».

Под эпитаксиальными системами понимаются тонкие многослойные полупроводниковые структуры (так называемые гетероструктуры или наноструктуры), нанесенные с помощью специальной технологии на твердую монокристаллическую подложку. Прогресс современной электроники и компьютерной техники, полностью базирующихся на полупроводниковых материалах, идет в направлении уменьшения размеров электронных систем, увеличения быстродействия и сокращения энергопотребления. С этой точки зрения, эпитаксиальные системы, характеристические размеры которых лежат в нанометровом диапазоне, являются предельно перспективными. Не случайно, что большинство работ по физике полупроводников делается именно на таких структурах, и за цикл работ по созданию и изучению полупроводниковых гетероструктур российский ученый академик Ж. И. Алфёров получил в 2000 г. Нобелевскую премию по физике. Приборы, созданные на основе гетероструктур (сверхскоростные транзисторы, гетеролазеры, светодиоды), уже получили широчайшее применение в оптических линиях связи, в системах записи и считывания компьютерной информации и др.

Своими уникальными физическими свойствами полупроводниковые гетероструктуры обязаны современному развитию технологических методов их изготовления и, прежде всего – технологии молекулярной пучковой эпитаксии (МПЭ). Особенностью этой технологии является возможность создавать материалы с заранее заданными параметрами, такими как химический состав, толщины гетерослоев, концентрация свободных носителей и пр. При этом любой физик, занимающийся исследованием эпитаксиальных гетероструктур, должен хорошо знать технологию их изготовления, чтобы представлять, в каких пределах и какой ценой можно эти параметры менять. В то же время, сама по себе эпитаксиальная технология, относящаяся к сфере современных высоких технологий, требует от исполнителей глубоких физических знаний и навыков, вследствие чего в этой области работают, как правило, специалисты, получившие физическое образование. Задача настоящего курса – дать студентам физического факультета

начальное представление об особенностях эпитаксиальной технологии и о ее возможностях.

II. Эпитаксиальные гетероструктуры – свойства и применения.

Под словом эпитаксия, образованном из греческих слов *epi* (на) и *taxis* (порядок), понимается управляемое выращивание тонких слоев с упорядоченной структурой на плоской монокристаллической подложке. Существенно, что кристаллическая структура эпитаксиальных слоев воспроизводит структуру подложки. Химический состав эпитаксиального слоя и подложки может различаться, но непременным условием эпитаксиального роста является близость значений постоянной решетки. Эпитаксиальные структуры отличаются следующими характерными свойствами:

1. По уровню структурного совершенства, отсутствию дефектов и примесей, эпитаксиальные слои значительно превосходят объемные материалы (в том числе и материал подложки).
2. Химический состав выращиваемых слоев может управляемым образом меняться (как ступенчато, так и плавно), что позволяет получать материалы с заранее заданными свойствами. Технология предполагает также возможность управляемого легирования слоев непосредственно в процессе роста.
3. Эпитаксия позволяет выращивать чередующиеся слои различного состава, причем, благодаря наличию атомно-резких границ, толщины слоев могут уменьшаться вплоть до атомных размеров. Выращенные таким образом структуры (квантовые ямы, сверхрешетки) приобретают уникальные физические свойства, отсутствующие у объемных материалов.
4. Качество поверхности эпитаксиального слоя значительно превосходит качество исходной поверхности подложки. Это позволяет создавать структуры с почти атомарно плоскими гетерограницами.

Благодаря этим особенностям, эпитаксиальные гетероструктуры приобретают следующие уникальные электрические и оптические свойства:

1. Высокое структурное совершенство эпитаксиальных слоев позволяет значительно снизить рассеяние свободных носителей и увеличить, тем самым, электрическую подвижность в материале.
2. Из-за крайне малого количества дефектов и примесей, являющихся ловушками для электронов дырок и экситонов, эпитакси-

альные структуры отличаются высоким квантовым выходом люминесценции, что резко повышает эффективность работы гетеролазеров и светодиодов, созданных на их основе.

3. Энергетическая структура тонких эпитаксиальных слоев во многом определяется эффектом размерного квантования, что позволяет, изменяя толщину слоев, направленным образом изменять их оптические характеристики.
4. Полупроводниковые эпитаксиальные гетероструктуры характеризуются исключительно быстрой электрической и оптической динамикой, что крайне важно для создания сверхскоростных электронных и вычислительных устройств.

Примером эффективного применения эпитаксиальных структур в электронике является высокоскоростной полевой транзистор (НЕМТ). В таком транзисторе ток течет в плоскости эпитаксиального слоя, и предельная частота переключения транзистора определяется скоростью протекания тока, т.е. подвижностью носителей. Как отмечалось выше, современная эпитаксиальная технология позволяет выращивать слои с крайне низкой концентрацией дефектов, способных рассеивать движущиеся носители. При этом основную роль рассеивателя начинает играть легирующая примесь, поставляющая носители в слой. Для того, чтобы избежать такого рассеяния, легируется не непосредственно проводящий слой, а соседние слои, характеризующиеся большей шириной запрещенной зоны (барьерные слои). Свободные носители, теряя энергию, уходят из легированного барьерного слоя в проводящий, не содержащий примесей, и с большой скоростью распространяются по нему.

Примерами оптических и оптоэлектронных приборов, созданных на основе эпитаксиальных гетероструктур, являются полупроводниковый светодиод и гетеролазер. Светодиод представляет собой $p-n$ переход, в котором носители разных знаков изначально пространственно разделены. При протекании тока через $p-n$ переход электроны и дырки оказываются в одной пространственной области и могут рекомбинировать с испусканием кванта света. Высокое качество эпитаксиальных слоев, формирующих $p-n$ переход, позволяет предельно снизить безизлучательные потери и добиться высокой эффективности такого устройства.

Если же на торцах светодиода сделать плоскопараллельные зеркала, т.е. создать резонатор, то прибор превращается в генератор стимулированного излучения – гетеролазер.

III. Принципы и методы эпитаксиального роста.

В основе упорядоченного роста лежит стремление частиц к минимуму суммарной энергии, который достигается, как правило, при регулярном их расположении. При росте объемного кристалла (например, из расплава) основная проблема заключается в том, глубина этого минимума оказывается сопоставимой с кинетической энергией, необходимой частице для того, чтобы добраться до нужного места в регулярной решетке. В результате этого, кристаллы вырастают с большим количеством дефектов (вакансий, атомов в междузлиях, дислокаций и др.). Кроме того, объемный рост идет сразу по нескольким направлениям, вследствие чего кристаллы часто получают блочными. Дополнительными источниками дефектов являются посторонние примеси, попадающие в кристалл из шихты и элементов конструкции ростовой установки.

Преимущества эпитаксиального роста:

1. Наличие заранее подготовленной кристаллической плоскости, задающей направление роста и структуру выращиваемого слоя.
2. Неравновесный характер процесса роста, обусловленный тем, что температура ростовой поверхности существенно ниже температуры плавления.
3. Наличие эффективной поверхностной диффузии атомов ростовых материалов.
4. Высокая чистота ростовых материалов и отсутствие контакта выращиваемой структуры с элементами конструкции.

Ниже будут рассмотрены основные варианты эпитаксиальной технологии, используемые в настоящее время.

А. Молекулярная пучковая эпитаксия - МПЭ. (Molecular-Beam Epitaxy – MBE)

Процесс МПЭ заключается в вакуумном напылении ростовых материалов на заранее подготовленную плоскую монокристаллическую подложку. Источниками ростовых материалов являются тигли с шихтой, расположенные на значительном (порядка 0.5 м) удалении от подложки. При выращивании слоев, имеющих многокомпонентный химический состав (например, GaAs), материалы каждой из компонент (Ga и As) помещаются в отдельный тигель. Тигли нагреваются до высокой температуры, при которой происходит эффективное испарение материала шихты.

Отличительной особенностью процесса МПЭ является то, что он идет в условиях сверхвысокого вакуума – давление газов в росте-

вой камере не превышает 10^{-7} Па. При таком давлении расстояние между молекулами газа составляет, в среднем, 10^{-3} см. При диаметре молекулы $10^{-7} - 10^{-6}$ см вероятность столкновения молекул, определяемая квадратом отношения размера молекул к расстоянию между ними, имеет порядок 10^{-7} , что соответствует длине свободного пробега 10^4 см, т.е. величине, заметно превышающей расстояние между молекулярными источниками и подложкой. В результате атомы ростовых материалов, испаряемые из тиглей, движутся к подложке по прямолинейной траектории в виде сравнительно узких пучков, сформированных конфигурацией тиглей. Подложка нагревается до высокой температуры ($500 - 700^\circ\text{C}$), при которой происходит эффективная поверхностная диффузия атомов.

Основные преимущества технологии МПЭ:

1. Высокая чистота процесса, обусловленная сверхвысоким вакуумом и использованием сверхчистых ростовых материалов.
2. Возможность практически безинерционного управления составом выращиваемой структуры, достигаемая за счет большой скорости пролета молекулярных пучков к подложке.
3. Возможность непосредственно контролировать процесс роста методами масс-спектрометрии и дифракции быстрых электронов (ДБЭ), требующими высокого вакуума.

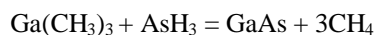
К недостаткам технологии МПЭ относятся:

1. Техническая сложность ростовой установки и неустойчивость процесса роста к изменению ростовых параметров предъявляют высокие требования к квалификации технологического персонала.
2. Малая скорость ростового процесса, составляющая, в среднем, 1 мкм/час. С учетом всех подготовительных процедур, на выращивание одной эпитаксиальной структуры уходит полная рабочая смена.
3. Высокая стоимость выращиваемых структур, в которую входят затраты на амортизацию дорогостоящей установки, высокая стоимость сверхчистых ростовых материалов и затраты на оплату труда высококвалифицированного персонала.

Б. Газофазная эпитаксия из металло-органических соединений - ГФЭ. (Metal-Organics Compound Vapor Deposition – MOCVD)

При газофазной эпитаксии кристаллов, типа GaAs, исходными ростовыми материалами являются газообразные алкиды металлов (например, $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$) и также газообразный арсин - AsH_3 . Технологический процесс происходит в замкнутом объеме - реакторе, но, в отличие

от МПЭ, процесс не требует высокого вакуума. Струи исходных материалов направляются на нагретую подложку, на которой происходит химическая реакция:



Слой GaAs осаждается на подложку, а второй продукт реакции – газообразный метан, CH_4 , откачивается из реактора. Нагрев подложки необходим по двум причинам: во-первых, химическая реакция является эндотермической, т.е. требует дополнительного тепла, и это тепло поставляется из подложки, а во-вторых, так же как в методе МПЭ, нагрев способствует поверхностной диффузии атомов.

Давление газов в реакторе может варьироваться в широких пределах в зависимости от требований к выращиваемым структурам. Уменьшение давления повышает резкость гетерограниц, но при этом повышается возможность загрязнения ростовых материалов в результате контакта со стенками реактора. Для уменьшения такого контакта реактор иногда заполняется буферным газом – водородом или азотом.

Достоинства ГФЭ:

1. Существенно большие, чем в МПЭ, простота и устойчивость процесса роста.
2. Приблизительно в десять раз большая скорость роста (около 10 мкм/час).
3. Более дешевые ростовые материалы.

Недостатки ГФЭ:

1. Невозможность обеспечить высокую чистоту технологического процесса.
2. Невозможность непосредственно контролировать процесс роста.
3. Технические сложности, связанные с высокой токсичностью используемых материалов.

В. Атомно-слоевая эпитаксия (Atomic Layer Epitaxy – ALE).

Исходные ростовые материалы в атомно-слоевой эпитаксии те же, что и в ГФЭ, однако здесь рост идет не непрерывно, а послойно, причем каждый слой выращивается в несколько стадий.

На первой стадии ростовая поверхность обдувается газообразным алкидом металла. При контакте с поверхностью молекулы поляризуются – атомы металла встраиваются в кристаллическую решетку, а алкидный остаток, наоборот, отталкивается от поверхности. В итоге вся ростовая поверхность покрывается слоем поляризованных молекул, причем наружный слой, состоящий из алкидных остатков, препят-

ствует осаждению следующего молекулярного слоя. После этого газообразные алкиды, не осевшие на поверхность, откачиваются из реактора.

На следующей стадии ростовая поверхность облучается светом, отрывающим ионы алкидов от атомов металла, и ионный газ также откачивается из реактора. Ростовая поверхность оказывается покрытой атомарным слоем металла.

После этого в реактор запускается газообразный арсин, молекулы которого так же, как и в предыдущем случае покрывают ростовую поверхность и поляризуются, а не адсорбированные молекулы арсина откачиваются.

На последней стадии осуществляется фотоионизация осажденных молекул арсина, ионы водорода откачиваются из реактора, а ростовая поверхность оказывается покрытой одним молекулярным слоем выращиваемого материала. Далее процесс можно повторять и вырастить тем самым целое число молекулярных слоев.

Достоинства метода атомно-слоевой эпитаксии:

1. Возможность абсолютно точного задания толщины выращиваемого слоя.
2. Возможность выращивания эпитаксиальных слоев на поверхности любой формы.

Недостатки метода:

1. Процедура выращивания атомных слоев получается очень громоздкой, поэтому скорость роста крайне низка (не более 0.1 мкм/час).
2. Здесь не используется поверхностная диффузия атомов, поэтому уровень структурной дефектности эпитаксиального слоя оказывается очень высоким.

Метод атомно-слоевой эпитаксии не нашел к настоящему моменту широкого применения и используется только для решения отдельных частных задач.

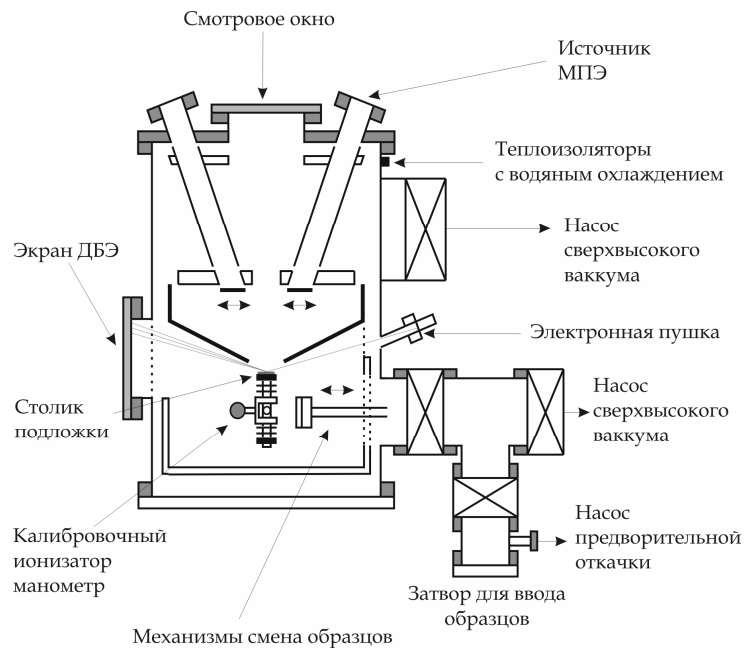
Технология ГФЭ (а также ее аналог – жидкофазная эпитаксия из металлоорганических соединений) используется в тех случаях, когда нужно с минимальными затратами и за короткое время изготовить большое количество структур, к качеству которых не предъявляются слишком высокие требования. В тех же случаях, когда нужны высококачественные эпитаксиальные структуры, а в большинстве случаев ситуация оказывается именно такой, безусловным преимуществом обладает технология МПЭ. Исходя из этого, ниже будет рассматриваться только этот, наиболее прогрессивный вариант эпитаксиальной технологии.

IV. Устройство и работа технологического комплекса молекулярной пучковой эпитаксии.

Основными структурными элементами комплекса МПЭ являются:

1. Ростовой модуль.
2. Вспомогательные вакуумные модули.
3. Система откачки.
4. Криосистема.
5. Контрольно-аналитические приборы.
6. Система управления технологическим процессом.

Далее будут подробно рассмотрены назначение и устройство каждого из элементов.



А. Технологический ростовой модуль.

Ростовой модуль является основным элементом технологического комплекса. В нем полностью осуществляется процесс выращивания эпитаксиальной структуры.

Основные узлы ростового модуля:

- Вакуумная камера;
- Узел крепления подложки;
- Узел молекулярных источников;
- Система откачки;
- Криопанели;
- Транспортная система;
- Контрольно-аналитическая аппаратура.

Вакуумная камера выполняет две основные функции: она герметично изолирует ростовую полость от атмосферного воздуха и одновременно является несущей конструкцией для крепления всех остальных элементов ростового модуля. Вакуумная камера изготавливается из нержавеющей стали и имеет либо цилиндрическую, либо шарообразную форму. В современных технологических комплексах вакуумная камера имеет довольно большие размеры: ее объем может достигать до 0.5 м^3 .

Узел крепления подложки (манипулятор) – один из наиболее сложных узлов ростового модуля. Помимо крепления и прецизионного перемещения подложки, этот узел осуществляет также нагрев подложки до рабочей температуры. Поскольку подложка представляет собой очень хрупкую кристаллическую пластинку, она предварительно закрепляется на изготовленном из молибдена металлическом диске-носителе, вместе с которым она затем транспортируется и укрепляется на манипуляторе. Крепление подложки к носителю осуществляется либо путем пайки индием, либо с помощью специальных проволочных захватов. Для нагрева подложки в манипулятор вмонтирована электрическая печь, представляющая собой плоскую металлическую спираль (меандр), укрепленную на керамической пластине из нитрида бора. Этот материал отличается высокой термостойкостью и хорошими вакуумными свойствами, сохраняющимися даже при сильном нагреве. Температура нагрева контролируется термопарой.

Узел молекулярных источников – второй по сложности узел ростового модуля. Молекулярный источник включает в себя заполняемый твердой шихтой тигель (изготавливаемый, как правило, также из нитрида бора), нагреватель – цилиндрическую спираль, охватывающую наружную поверхность тигля, и систему термоэкранов, предохраняющих окружающие детали от нагрева. Температура нагрева шихты контролируется термопарой. Кроме того, каждый молекулярный источник снабжен заслонкой, способной по управляющему сигналу открывать и перекрывать молекулярный пучок. Материалы конструкции источника – молибден и титан.

Система откачки обеспечивает достижение рабочего вакуума в ростовой камере. Для получения сверхвысокого вакуума в большом объеме приходится использовать три ступени откачки. На первой ступени при откачке от атмосферного давления приходится использовать механический форвакуумный насос. После того, как основная масса атмосферного воздуха удалена, форвакуумная откачка прекращается и включаются криогенные абсорбционные насосы, заполненные цеолитом или активированным углем. На последней стадии откачки включается титановый магниторазрядный насос, который является основным насосом, создающим и поддерживающим сверхвысокий вакуум. Для компенсации избыточного газовыделения, возникающего на некоторых стадиях процесса роста, может использоваться также титановый геттерный насос, способный на короткое время резко повысить скорость откачки.

Криопанели представляют собой заполняемые жидким азотом емкости, окружающие наиболее нагретые элементы ростового модуля – манипулятор и молекулярные источники. Кроме того, отдельная криопанель охлаждает геттерный насос, повышая тем самым его адсорбционную способность.

Транспортная система нужна для того, чтоб можно было в вакуумных условиях дистанционно перемещать подложку с носителем из загрузочной камеры в ростовой модуль и укреплять носитель на манипуляторе, а также для удаления из ростового модуля выращенных структур.

Б. Вспомогательные вакуумные модули.

Вспомогательным модулем является, прежде всего, шлюзовая камера (камера загрузки), предназначенная для перемещения смонтированной на носителе подложки из лабораторного помещения в ростовой модуль. Камера загрузки отделена от ростового модуля вакуумным затвором. При загрузке подложки камера открывается на воздух и в ней устанавливается атмосферное давление. Затем камера изолируется и откачивается для высокого вакуума. Благодаря малому объему камеры загрузки это происходит достаточно быстро. После этого открывается затвор, подложка переносится в ростовой модуль и укрепляется на манипуляторе. Извлечение выращенных структур производится в обратном порядке.

В некоторых моделях технологических комплексов МПЭ предусмотрены также дополнительные вакуумные модули, предназначенные для анализа выращенных структур до их извлечения из комплекса. Такие модули позволяют анализировать состав выращенных

структур методами Оже-спектроскопии или вторичной ионной масс-спектрометрии.

В. Система откачки технологического комплекса.

Помимо системы откачки ростового модуля имеется развитая (многокомпонентная) система откачки остальных вакуумных частей технологического комплекса. В нее входят форвакуумный и абсорбционные насосы, соединенные трубопроводом со всеми вакуумными модулями, магниторазрядные насосы, находящиеся на каждом вакуумном модуле, и блоки электрического питания магниторазрядных насосов. Система откачки снабжена большим количеством вакуумных вентилях, позволяющих при необходимости изолировать любой из элементов системы.

Г. Криосистема.

Криосистема предназначена для удаления избыточного тепла, выделяющегося в процессе работы ростового модуля. Основной охлаждающей жидкостью является жидкий азот, но в некоторых вариантах эпитаксиальных комплексов дополнительно используется водяное охлаждение. Элементами криосистемы являются криопанели в ростовом модуле, описанные выше, и внешние устройства, обеспечивающие непрерывную подачу жидкого азота в криопанели. Конструкции этих устройств не унифицированы и существенно различаются в разных технологических комплексах.

Д. Приборы контроля и анализа.

Задача этих приборов – контроль технологических параметров (давления и состава атмосферы в ростовой камере, температуры источников и подложки, соотношения плотностей молекулярных пучков) и анализ состояния ростовой поверхности в течение всего технологического процесса. В качестве контрольных устройств используются вакуумметры и термометры, а также такие многофункциональные приборы, как масс-спектрометр и дифрактометр быстрых электронов (ДБЭ).

Е. Система управления технологическим процессом (АСУ ТП).

Система предназначена для задания и контроля основных параметров технологического процесса в реальном времени. К таким параметрам относятся температуры молекулярных источников и подложки, а также моменты открывания и закрывания заслонок на источниках. Основной режим работы системы – автоматический, при

котором весь технологический процесс роста программно управляется персональным компьютером. Для подготовительных предростовых процедур предусмотрена возможность ручного и полуавтоматического управления соответствующими параметрами. Помимо персонального компьютера в систему управления входят периферические микропроцессорные устройства, блоки питания нагревателей, приводы заслонок и пр.

V. Технологический процесс МПЭ

Процесс молекулярной пучковой эпитаксии помимо основной ростовой процедуры включает в себя также ряд подготовительных процедур, без которых невозможно получение высококачественных эпитаксиальных структур. К этим процедурам прежде всего относятся предростовая подготовка подложек и подготовка ростового модуля. Ниже будут кратко рассмотрены особенности этих процедур.

А. Изготовление и подготовка подложек.

Подложки представляют собой пластины GaAs, вырезанные из большого монокристалла. Стандартная толщина пластин 0.4 – 0.6 мм, диаметр 25 – 60 мм. Пластины, как правило, вырезаются параллельно кристаллографической плоскости [100], но в некоторых случаях допускается отклонение от этой плоскости на 1 – 3°. Ростовая поверхность пластины шлифуется и полируется до высокого оптического качества (т.е. представляет собой хорошую зеркальную поверхность), после чего подвергается химической обработке. Обработка преследует две цели: удаление загрязнений и улучшение качества поверхности.

Обработка включает в себя две стадии:

1. Обезжиривание (удаление органических загрязнений).
2. Травление, удаляющее неорганические загрязнения и выглаживающее поверхность подложки.

Обезжиривание осуществляется путем кипячения в органических растворителях: ацетоне, толуоле, пропиловом спирте.

Состав травителя: $x\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

Величина x варьируется в пределах: $4 < x < 20$.

После каждой стадии обработки подложка промывается под струей бидистиллированной воды. Последняя промывка после травления сопровождается образованием на поверхности подложки окисной пленки, играющей защитную роль. Далее подложка сушится в парах ацетона или в центрифуге. Чистая подложка монтируется на носитель и загружается в ростовую установку.

Б. Подготовка ростового модуля.

После изготовления или длительного вскрытия все вакуумные элементы ростового модуля должны быть тщательно обезгажены путем многоступенчатого прогрева. Так, например, при установке новых молекулярных источников, их прогревают в три стадии:

1. Предварительный прогрев без шихты в форвакууме.
2. Прогрев в ростовом модуле до предельных температур (на 50 – 100° выше рабочих). Прогрев производится в условиях интенсивного охлаждения криопанелей жидким азотом.
3. Загрузка шихты и прогрев до температур на 10 – 20° превышающих рабочие.

После завершения прогрева рабочих элементов осуществляется общий прогрев ростовой камеры до температур 250 – 300°С для удаления адсорбированных газов с ее поверхности. Затем камера охлаждается до комнатной температуры и откачивается в течение нескольких суток до рабочего давления 10^{-8} Па. Подготовка к технологическому процессу завершается загрузкой в ростовый модуль свежей подложки.

В. Основные стадии технологического процесса.

1. Выход на дежурный режим. На этой стадии осуществляется постепенный подъем температур молекулярных источников и подложки с постоянным контролем давления и состава атмосферы в ростовой камере. Нагрев осуществляется при закрытых заслонках на всех источниках и в условиях полноценного охлаждения всех криосистем.
2. Сгон окисла. Технический термин «сгон окисла» обозначает процесс удаления окисной пленки путем ее испарения. Окисел предохраняет поверхность подложки от загрязнений, но при этом является препятствием для эпитаксиального роста. Окисел испаряется при температуре 580°С, унося при этом все адсорбированные на нем молекулы атмосферных газов. При нагреве до таких температур начинается интенсивное испарение с поверхности атомов As, что может привести к образованию на ростовой поверхности капель металлического Ga (галлиевая стабилизация). Ga-стабилизированная поверхность непригодна для эпитаксиального роста, поэтому, в избежание стабилизации, сгон окисла необходимо производить в условиях избытка As. В соответствии с этим, перед сгоном окисла необходимо вывести источник As на рабочий температурный режим и открыть заслонку на источнике.

При испарении окисла, имеющего аморфную структуру, открывается свободная поверхность подложки, имеющая кристаллическую структуру. Поэтому факт сгона окисла фиксируется с помощью ДБЭ по появлению на экране ДБЭ дифракционных рефлексов от кристаллических слоев подложки.

3. Выращивание подготовительного слоя GaAs. Перед этим источник Ga и подложка нагреваются до ориентировочных рабочих температур. Рост производится в течение 5 – 10 мин. Задача этого этапа – получение гладкой ростовой поверхности, дающей хорошую картину дифракции на экране ДБЭ.
4. Калибровка температуры подложки. Необходимость этого этапа связана с тем, что термомпара на манипуляторе не находится в прямом тепловом контакте с подложкой и определенная по ее показаниям температура существенно отличается от истинной температуры подложки. Для калибровки используется наличие особых температурных точек, соответствующих реконструкциям конфигурации избыточных атомов As на поверхности GaAs. Каждая конфигурация обладает характерной периодичностью в направлениях, параллельных кристаллографическим осям второго порядка, и изменение этой периодичности фиксируется по картине дифракции. По полученным точкам строится калибровочная кривая, однозначно связывающая показания термомпары с реальной температурой ростовой поверхности.
5. Калибровка скорости роста. Калибровка осуществляется по изменению интенсивности зеркального рефлекса на экране ДБЭ. Интенсивность рефлекса имеет максимальное значение при отражении от атомарно гладкой поверхности. В процессе роста на поверхности появляются островки следующего молекулярного слоя, что приводит к уменьшению интенсивности рефлекса. По мере заполнения молекулярного слоя интенсивность начинает восстанавливаться и доходит до максимального значения, когда слой полностью заполнен. Таким образом, процесс эпитаксиального роста сопровождается осцилляциями интенсивности рефлекса, причем период осцилляций соответствует времени выращивания одного молекулярного слоя. Воспользовавшись картиной осцилляций можно определить значения температур молекулярных источников (точнее, показания термомпар), соответствующие требуемым скоростям.
6. Задание программы и запуск процедуры роста в автоматическом режиме. В программе задаются значения показаний термомпар манипулятора и молекулярных источников в каждый момент

времени и моменты открывания и закрывания соответствующих заслонок.

Для получения гетероструктур с высоким кристаллическим совершенством необходимо перед ростом основной структуры вырастить ряд подготовительных слоев. Обычно используется комбинация из слоев двух типов:

1. Буферный слой GaAs. Буферный слой имеет толщину 0.5 – 1 мкм и он предохраняет от попадания в основную структуру точечных дефектов и примесей из подложки.
2. Короткопериодная GaAs/AlAs сверхрешетка. Сверхрешетка сформирована чередующимися тонкими (порядка 1 nm) слоями GaAs и AlAs. Вследствие несовпадения постоянных решетки у этих материалов, на гетерограницах возникают механические напряжения, препятствующие прорастанию из подложки в основную структуру линейных дефектов – дислокаций.

После окончания ростовой программы ростовой модуль автоматически переводится в дежурный режим и затем медленно остужается.