

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО**

**Научно-исследовательский физико-технологический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского**

**ВЫРАЩИВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ
МЕТОДОМ ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ ИЗ МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ
СОЕДИНЕНИЙ**

Описание лабораторной работы

Составители: с.н.с. НИЧ ННГУ, к.ф-м.н. Байдусь Н.В.
вед.н.с. НИФТИ, к.ф-м.н. Звонков Б.Н.

Нижний Новгород, 1999

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭПИТАКСИИ.....	4
II. МЕТОДИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЁВ GAAS МОС-ГИДРИДНЫМ МЕТОДОМ	6
2.1. Физико-химические основы ГФЭ МОС	6
2.2. Влияние условий роста на структуру и морфологию слоев.	8
2.3. Технологическая установка для эпитаксии слоев и методика эпитаксиального выращивания пленок	9
ЛИТЕРАТУРА.....	15
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	15

ВВЕДЕНИЕ

Эпитаксиальный рост монокристаллических слоев полупроводников из газовой фазы широко используется в технологии полупроводниковых приборов и интегральных схем. Прогресс в твердотельной электронике в значительной степени связан с использованием многослойных квантово-размерных гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) и квантовыми точками (КТ), которые формируются из материалов с различной шириной запрещенной зоны.

В настоящее время существуют два основных технологических метода эпитаксии, позволяющие формировать многослойные структуры со сверхтонкими слоями. Это молекулярно-лучевая и газо-фазная эпитаксия, в том числе с использованием металлоорганических соединений (МОС) и гидридов (ГФЭ МОС). Второй метод выгодно отличается от первого тем, что не требует дорогостоящего оборудования, обладает высокой производительностью. Достоинствами МОСГЭ являются также необратимость химических реакций, лежащих в его основе, и отсутствие в парогазовой смеси химически активных с растущим слоем компонент. Это позволяет проводить процесс эпитаксии при сравнительно низких температурах роста и осуществлять прецизионную подачу исходных веществ, что позволяет обеспечить контролируемое легирование слоев и получение структур в широком диапазоне составов твердых растворов с резкими концентрационными переходами.

К недостаткам МОС-гидридного метода можно отнести высокую токсичность используемых исходных соединений, в первую очередь арсина, а также сложность химических процессов, приводящих к образованию слоя GaAs, что затрудняет моделирование условий образования эпитаксиальных слоев с нужными свойствами.

Цель данной лабораторной работы состоит в:

- ознакомлении студентов с физико-химическими основами эпитаксиального роста методом МОСГЭ,
- получении практических навыков работы с технологическим оборудованием и полупроводниковыми материалами.

I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭПИТАКСИИ

Эпитаксия — это ориентированное нарастание одного кристалла на другой. Термин происходит от греческих слов *επι* — на и *ταξις* — упорядоченность. Закономерность нарастания состоит в совпадении определенных, обычно кристаллографически простых, плоскостей и направлений нарастающего кристалла и кристалла-подложки. Различают **автоэпитаксию**, когда растущий кристалл и подложка имеют одинаковый химический состав и структуру, и **гетероэпитаксию**, когда они разные. Эпитаксия чаще всего имеет место при сравнительно небольших ($\leq 10\%$) различиях параметров решеток. Однако ориентированное нарастание происходит и при разнице параметров, составляющих десятки процентов. При большом несоответствии параметров решетки всегда сохраняется, однако, соответствие плотноупакованных плоскостей и направлений в них.

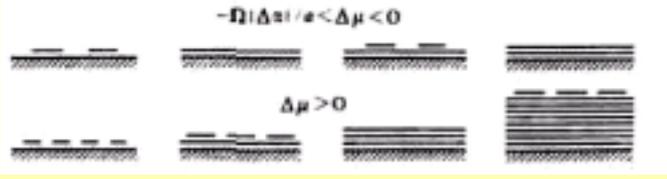
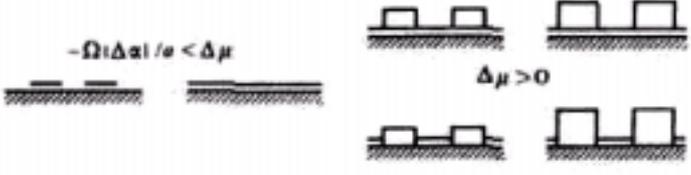
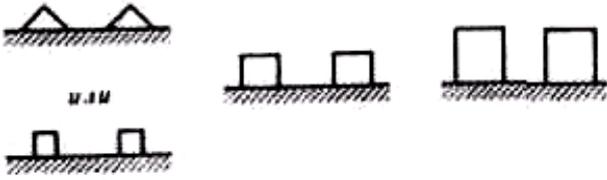
В основу современной классификации различных механизмов гетерогенного образования зародышей и эпитаксии (таблица 1) положена величина $\Delta\alpha$ - изменение поверхностной энергии системы. Чем прочнее адгезия кристалла на подложке, тем меньше $\Delta\alpha$, тем меньше работа образования зародышей $\delta\Phi_c$ и тем меньшее отклонение от равновесия химического потенциала $\Delta\mu$ требуется для его появления. Величину $\Delta\alpha$ можно выражать через энергию связей:

$$\Delta\alpha = 2\alpha - \alpha_s = (\varepsilon_1 - \varepsilon_s) / a^2,$$

где ε_s - энергия адсорбции, α_s - свободная энергия адгезии, ε_1 - энергия связи между ближайшими соседями в кристалле. Разность $\varepsilon_1 - \varepsilon_s$ в атомистической теории определяет все главные характеристики процесса зарождения.

В зависимости от $\Delta\alpha$ различают три основных механизма гетероэпитаксиального выращивания (см. табл. 1). Мы рассмотрим два крайних случая: механизм **Франка—ван-дер-Мерве** ($2\alpha < \alpha_s$) и механизм **Фольмера—Вебера** ($2\alpha > \alpha_s$).

Таблица 1. Механизмы эпитаксии и их характеристики.

<p>Франк — ван-дер-Мерве (сильная адгезия, полное смачивание)</p> 	<p>$\Delta\alpha < 0$ или $2a < \alpha_s$</p>	<p>$\varepsilon_1 - \varepsilon_s < \Delta\mu < 0$, недосыщение относительно макрофазы</p>
<p>Странский — Крастанов</p> 	<p>Первые слои: $\Delta\alpha < 0$ Трехмерные кристаллы: $\Delta\alpha > 0$</p>	<p>Первые слои: $\Delta\mu < 0$ Трехмерные кристаллы: $\Delta\mu > 0$</p>
<p>Фольмер — Вебер (слабая адгезия)</p> 	<p>$\Delta\alpha > 0$ или $\Delta\alpha > \alpha_s$</p>	<p>$\Delta\mu > 0$</p>

Механизм Франка — ван-дер-Мерве характерен для пар конденсат— подложка, отличающихся столь прочной адгезией, что энергия связи кристалл— подложка больше энергии связи между атомами кристалла, $\varepsilon_s > \varepsilon_1$. В этом случае полного смачивания $\Delta\alpha < 0$ образование одного или нескольких слоев конденсата на подложке термодинамически выгодно, даже если пар недосыщен, точнее, при условии $-\Omega|\Delta\alpha|/a \approx \varepsilon_1 - \varepsilon_s < \Delta\mu < 0$, где Ω - объем, приходящийся на один атом в кристалле. Работа $\delta\Phi_c$ образования зародышей на подложке невелика.

При нарастании по Франку — ван-дер-Мерве межатомные расстояния a в атомных сетках конденсата и подложки, параллельных границе раздела, оказываются в точности одинаковыми. Другими словами, пленка конденсата либо растянута, либо сжата в плоскости подложки. Соответственно в направлении, перпендикулярном этой плоскости, пленка будет сжата или растянута, причем эта деформация определяется в первом приближении уравнениями теории упругости и величиной коэффициента Пуассона. Если отвлечься от этой последней деформации, то можно сказать, что атомы конденсата укладываются в решетку подложки, надстраивая ее и образуя *псевдоморфный слой*.

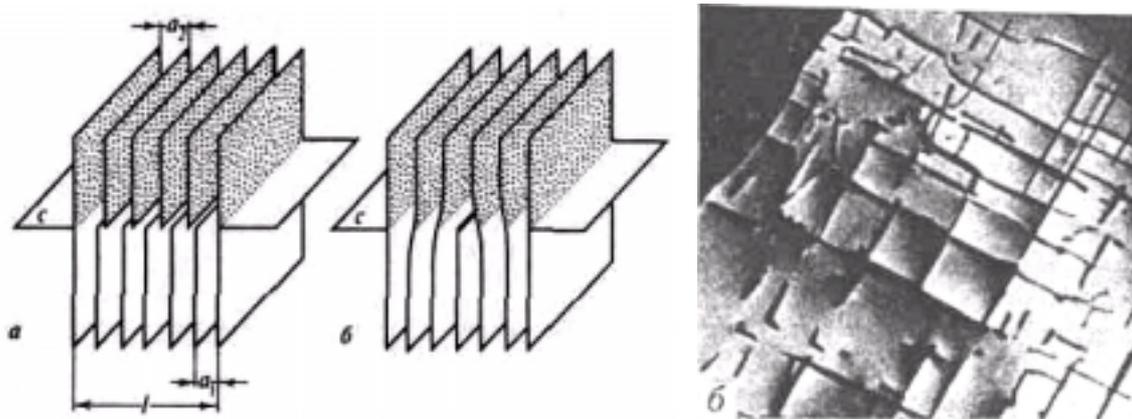


Рис. 1. Сопряжение атомных плоскостей на границе с двух кристаллов
 а — все атомные плоскости, кроме крайних, оборваны, но не искривлены;
 б — все плоскости, кроме одной, замкнуты; край единственной оборванной плоскости образует дислокацию несоответствия (показана жирной линией)
 в - рентгенотопографическое изображение дислокаций несоответствия в пленке

Механизм Фольмера — Вебера (третья строка табл. 1) - характерный для слабой адгезии кристалла на подложке. В этом случае работа образования зародыша на подложке больше, чем при других механизмах роста, и может даже приближаться к работе гомогенного зарождения при нулевой адгезии ($\alpha_s \ll 2\alpha$), когда $\Delta\alpha \approx 2\alpha$. Соответственно роль неоднородностей, снижающих барьер зарождения, для механизма Фольмера-Вебера наибольшая. Слабая адгезия ведет также к менее выраженной связи ориентации кристалла-конденсата с подложкой, что проявляется в образовании для одной и той же пары кристалл — подложка нескольких эпитаксиальных соотношений, реализующихся в разных условиях осаждения, а также одновременно.

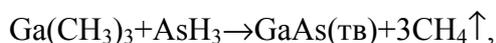
II. Методика и технология выращивания эпитаксиальных слоёв GaAs МОС-гидридным методом

2.1. Физико-химические основы ГФЭ МОС

Особенность метода состоит в том, что в эпитаксиальном реакторе создается высокотемпературная зона, в которую поступает газовая смесь, содержащая разлагаемое соединение. В этой зоне протекает реакция и происходит выделение и осаждение вещества на подложке, а газообразные продукты реакции уносятся потоком газа-носителя. Для получения соединений $A^{III}B^V$ в качестве источника элемента III группы используют

металлоорганические соединения (например, триметилгаллий (ТМГ) для синтеза GaAs и триметилиндий (ТМИ) для InP или InGaP). В качестве источников элементов V группы служат газы арсин и фосфин.

Суммарной реакцией формирования арсенида галлия в МОС-гидридном процессе является реакция типа



которая протекает с образованием множества промежуточных соединений. Как правило, процесс пиролиза (разложения) проводят при атмосферном давлении в потоке водорода, реже - при пониженном давлении.

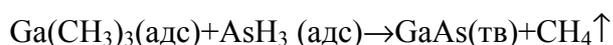
Процесс разложения молекулы ТМГ протекает в несколько стадий, при которых последовательно удаляются алкильные группы. Введение водорода приостанавливает полный распад метильных радикалов (-СН-) и приводит к образованию метана:



Это обстоятельство является благоприятным фактором, снижающим концентрацию свободного углерода в твердом осадке. Этому способствует и пиролиз (термическое разложение) арсина, в результате которого выделяется химически активный атомарный водород.

В зависимости от места, где происходит разложение соединений, возможны два механизма пиролиза – *гомогенный* и *гетерогенный*.

При гетерогенном механизме пиролиза химические реакции разложения соединений и синтеза полупроводникового материала происходят на поверхности подложки. Поверхность подложки достигают как молекулы, так и радикалы галлия (или индия). Адсорбируясь на поверхности подложки, они вступают в гетерогенную реакцию с адсорбированными молекулами арсина



или



При гомогенном механизме пиролиза все химические реакции происходят в газовой фазе: соединения ТМГ и AsH₃ образуют комплексы, которые при нагреве вследствие перемешивания газа при движении вдоль реактора образуют кластеры GaAs. Последние диффундируют к поверхности подложки, адсорбируются и встраиваются в кристаллическую решетку.

Преобладание того или иного механизма пиролиза зависит от конкретных условий: конструкции реактора, скорости газового потока, концентрации исходных веществ и материала подложки.

При изучении сложного процесса гетерогенных химических реакций разделяют перенос вещества в газовой фазе (диффузионная стадия) и процессы на растущей поверхности (кинетическая стадия). Стадия переноса включает доставку реагирующих веществ к растущему кристаллу и удаление продуктов реакции в газовую фазу. К процессам на поверхности относятся адсорбция реагирующих веществ, их химическое взаимодействие на поверхности, т.е. собственно реакция, и десорбция продуктов реакции.

При сравнительно низких (~ 500 °C) температурах, когда скорость химических реакций невысока, скорость роста лимитируется термическим разложением химических соединений на поверхности, процесс протекает в *кинетическом* режиме. При сравнительно высоких температурах (>600 °C) происходит переход к *диффузионному* режиму, в котором скорость реакции ограничена скоростью доставки разлагаемых соединений к подложке.

2.2. Влияние условий роста на структуру и морфологию слоев.

Основными морфологическими элементами ростового рельефа слоев арсенида галлия являются ступени роста и фигуры роста. Образование фигур роста следует рассматривать как нарушение слоевого механизма роста, характерного для основной матрицы пленки.

При низких температурах роста (T_p) эпитаксиальные слои имеют, как правило, большие нарушения структуры и плохую морфологию поверхности. Повышение температуры подложки от 500°C до 670°C приводит к их улучшению. Это связано с несколькими факторами: увеличением скорости поверхностной диффузии реагентов или их комплексов, усилением десорбции метильных групп с поверхности растущего слоя и увеличением скорости пиролиза арсина. При дальнейшем увеличении T_p структура и морфология эпитаксиального слоя ухудшается вследствие интенсивной десорбции атомов Ga и As с его поверхности.

Важную роль оказывает влияние отношения As/TMГ (γ). При больших значениях γ и высоких температурах роста вхождение фоновой примеси в слои GaAs определяется вакансиями галлия. При малых значениях γ и низких температурах роста – вакансиями мышьяка. Поэтому при больших γ и высоких T_p слои растут n-типа проводимости, в противоположном случае – p-типа проводимости. Таким образом, вакансии мышьяка, капли галлия или комплексы Ga и As на поверхности роста ответственны за высокую плотность фигур росёта и дислокаций при малых значениях γ и низких T_p .

2.3. Технологическая установка для эпитаксии слоев и методика эпитаксиального выращивания пленок

Выращивание эпитаксиальных слоев арсенида галлия производится на установке, схема которой представлена на рис. 3. Установка включает в себя следующие основные части:

- реактор, в котором располагается пьедестал с подложкой,
- систему напуска реагентов, обеспечивающую их дозированную подачу в реактор,
- систему откачки и утилизации реагентов.

Реактор представляет собой кварцевую горизонтально расположенную трубу диаметром 50 мм и длиной 0.5 м. Нагрев подложки, размещенной внутри реактора на графитовом наклонном пьедестале, осуществляется внешним резистивным нагревателем. При таком способе нагрева создаются изотермические условия для нагрева газовой смеси в зоне осаждения. Чтобы обеспечить однородность растущего слоя по всей поверхности, в процессе роста подложка вращается вокруг оси, перпендикулярной к ней.

Система напуска реагентов включает в себя баллоны с водородом, арсином, фосфином, термостатируемые барбатыры с триметилгаллием, триметилиндием, блок диффузионной очистки водорода, стабилизаторы давления газов (редукторы), регуляторы расхода газов, а также запорные краны и краны тонкой регулировки потока газов. Основные детали системы напуска реагентов изготовлены из нержавеющей стали.

Изменение концентрации ТМИ и ТМГ в реакторе осуществляется путем изменения потока водорода через соответствующий барбатер. Парциальное давление этих соединений внутри барбатера определяется температурой термостатирования барбатера.

Для вакуумирования реактора применяется форвакуумный насос типа 2НВР-5ДМ, обеспечивающий остаточное давление атмосферных газов порядка 10^{-2} мм.рт.ст.

Подготовка реактора. Перед экспериментом кварцевый реактор травят в смеси азотной и плавиковой кислот с целью удаления слоя арсенида галлия и мышьяка, осажденного на стенках реактора в процессе предыдущего синтеза, после чего тщательно промывают бидистиллированной водой и ацетоном марки ОСЧ. Затем реактор устанавливается на установку, откачивается форвакуумным насосом до давления 10^{-2} мм.рт.ст. и отжигается в потоке водорода при температуре, на 100°C превышающей температуру роста, в течение часа с целью удаления остаточных загрязнений, а также следов воды и ацетона.

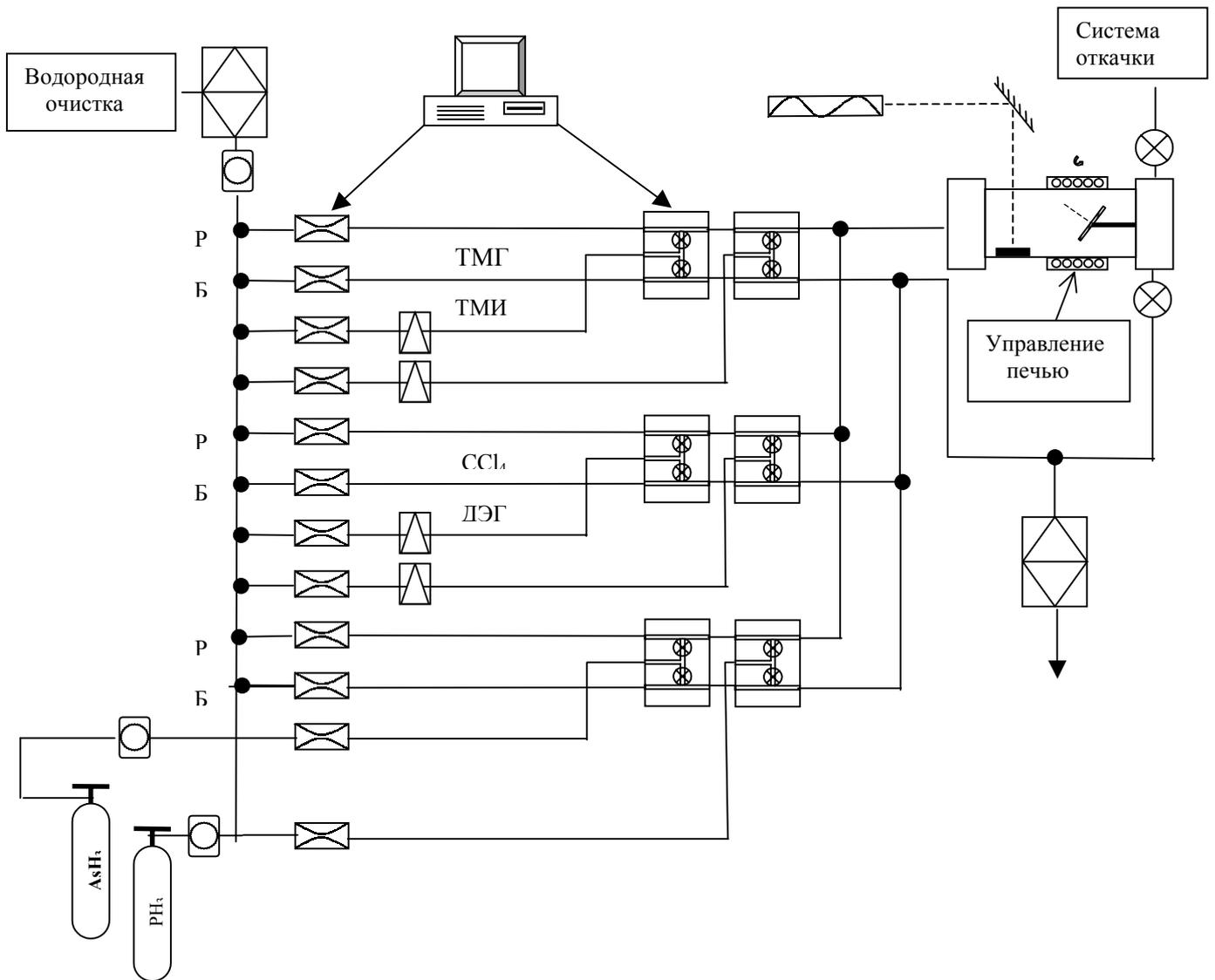


Рис. 2. Схема установки МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении.



Подготовка подложек. Пластины арсенида галлия, использующиеся в качестве подложек, подвергаются глубокому химическому полирующему травлению для удаления

нарушенного шлифовкой слоя и сглаживанию макрорельефа поверхности, а затем химико-механической полировке (ХМП) полуизолирующей суспензией на основе H_2O_2 - KOH . В результате такой обработки поверхность подложек имеет высоту неровностей $\sim 0,05$ мкм и нарушенный слой $2\div 3$ мкм. После ХМП пластины GaAs подвергаются химико-динамическому травлению в травителе состава $\text{H}_2\text{SO}_4(92-96\%) : \text{H}_2\text{O}_2(30\%) : \text{H}_2\text{O} = 3:1:1$ при 70°C , при этом удаляется слой $5\div 10$ мкм. Такая обработка обеспечивает зеркально-гладкую поверхность GaAs.

Расчет концентрации источников элементов в реакторе. Поток водорода через реактор определяется условием ламинарности (см.ниже) потока вблизи подложкодержателя и составляет примерно 2.7 л/мин. Концентрации компонент-источников элементов в потоке водорода определяются из условий выбора скорости роста пленки, отношения источников V/III, состава растущего слоя. Известно, что скорость роста GaAs определяется скоростью поступления атомов галлия на поверхность.

Рассчитать поток ТМГ можно следующим образом. Регулировка скорости потока газов η производится регуляторами расхода газов (РРГ), которые подбираются в зависимости от величины требуемых максимальных потоков (например, для водорода $\eta_m = 0.9$ л/час). Для компьютера, который управляет РРГ в процессе роста, необходимо задать безразмерное число делений n , пропорциональное требуемому потоку (максимальное число делений $n_m = 1000$). Поэтому обычно для программирования процесса роста необходимо рассчитать n для всех РРГ. Число делений РРГ, управляющего потоком газа через него, равно

$$n = \frac{\eta}{\eta_m} n_m = \frac{\eta}{\eta_m} 1000.$$

Эта формула применима для водорода, арсина и фосфина – источников, подающихся непосредственно из баллона.

Если источники в исходном состоянии - жидкость или твердое тело, то их подача в реактор осуществляется после насыщения парами этих веществ газа-носителя, в данном случае – водорода. Этот процесс осуществляют в барбатере. Равновесное давление паров P_0 в барбатере определяется температурой, при которой термостатируется содержащееся в нем вещество, и существенно зависит от вида этого вещества (рис. 4).

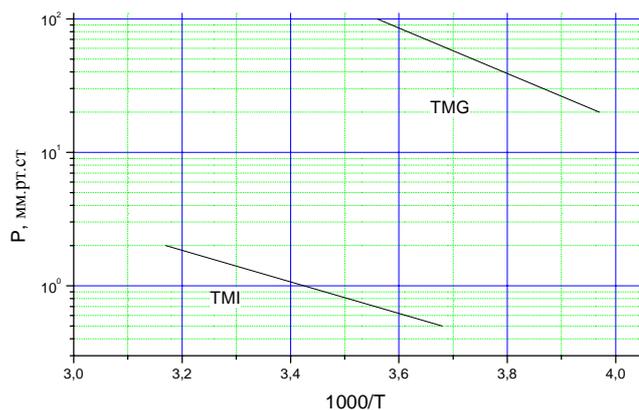


Рис.3. Температурные зависимости равновесного давления паров триметилиндия и триметилгаллия.

В этом случае концентрация будет определяться как равновесным давлением паров, так и скоростью потока водорода через барбатер:

$$\eta_{TMI} = \frac{P_{TMI}}{P_{H_2}} \eta_{H_2} = \frac{P_{TMI}}{760} \eta_{H_2},$$

где учтено, что водород находится при давлении 760 мм.рт.ст. Для оптимальных скоростей роста слоя 6-12 Å/с при 650°C поток ТМГ через реактор должен составлять примерно 6 миллилитров в час, что соответствует потоку водорода через барбатер с ТМИ 170 мл/час. Обычно барбатер с ТМГ термостатируется при температуре -15°C, что обеспечивает давление паров примерно 27 мм.рт.ст. Поток арсина η выбирается таким, чтобы обеспечить отношение потоков источников V/III порядка десяти.

Газодинамические условия в реакторе.

Для обеспечения резких границ раздела в выращиваемых гетеропереходах и одинаковых условий роста по поверхности образца необходимо обеспечить такие газодинамические условия в реакторе, чтобы распределение скорости газа по поперечному сечению реактора было равномерным, т.е. поток был ламинарным. Для характеристики газодинамических условий в реакторе рассчитывают число Рейнольдса :

$$Re = (v \rho d) / \eta,$$

где v – линейная скорость газа (водорода) в реакторе, ρ - плотность газа, η - коэффициент динамической вязкости газа. Эти величины зависят от температуры, поэтому оценку Re проводят для комнатной температуры, при которой его величина максимальна. Необходимо, чтобы Re для реактора было ниже его критической величины (2200), при которой происходит переход от ламинарного потока к турбулентному

Зная Re , можно рассчитать минимальное расстояние $l = Re^*$, на котором ламинарный поток можно считать сформированным. Подложкодержатель располагают в реакторе с учетом этой величины.

Легирование эпитаксиальных слоев GaAs в МОС-гидридном процессе.

Перспективы приборного применения эпитаксиальных слоев GaAs определяются возможностями легирования их в процессе роста. Основными и наиболее изученными элементами для легирования арсенида галлия являются кремний, сера и селен (n-тип), и цинк и магний (p-тип). Пригодность примеси для формирования резкого p-n перехода определяется рядом химико-физических факторов, таких как скорость диффузии в арсениде галлия, сегрегация и характер преобладающей реакции пиролиза.

В изучаемой установке применяются два способа введения легирующей примеси в реактор.

1. Введение в реактор **химического соединения** легирующего элемента, при этом а) если химическое соединение – газ при комнатной температуре (например, герман GeH_4 -источник германия), оно подается непосредственно из баллона;

б) если же источник является жидкостью, то его вводят в реактор путем насыщения газаносителя в барбатере. Концентрацию легирующего элемента в потоке водорода регулируют путем изменения скорости продувки водорода через барбатер и температурой его термостабилизации.

2. Распыление **твердой мишени соответствующих элементарных веществ** мощным лазерным излучением непосредственно в реакторе. Этот способ значительно упрощает газораспределительную систему, увеличивает выбор возможных примесей и уменьшает инерционность регулирования процесса введения примеси, что важно для получения резких границ легированных и нелегированных областей.

Лазерные мишени располагаются у стенки реактора на расстоянии 10 см от подложки. Излучение лазера проходит через противоположную стенку. Плоскость мишени параллельна газовому потоку в реакторе, а направление пучка испаряющихся атомов, подхватываемых этим потоком, - перпендикулярно ему. Для уменьшения глубины кратеров на поверхности мишени применяется сканирование лазерного пучка. В качестве источника лазерного излучения используется твердотельный импульсный лазер на $YAG:Nd$ с длиной волны излучения 1.06 мкм, работающий в режиме модуляции добротности. Максимальная энергия в импульсе длительностью 10нс составляет 0.3 Дж. Излучение фокусируется на поверхность в пятно размером $(2-4) \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$, что обеспечивает плотность мощности излучения 10^9 Вт/см^2 , достаточную для испарения

широкого круга легирующих материалов. Изменение концентрации легирующей примеси осуществляется изменением частоты следования импульсов.

Таблица 2. Характеристики основных легирующих примесей для GaAs, применяемых в МОС-гидридном методе.

Легирующий элемент	Тип примеси	Макс. конц. см ⁻³	Способ легирования
Te	донор	$9 \cdot 10^{18}$	лаз.расп.
Si	донор	$7 \cdot 10^{17}$	лаз.расп.
Be	акцептор	$5 \cdot 10^{17}$	лаз.расп.
Zn	акцептор	$5 \cdot 10^{18}$	лаз. расп.
Sn	донор	$8 \cdot 10^{17}$	лаз.расп.
C	акцептор	$3 \cdot 10^{19}$	из жид. CCl ₄

Методика эпитаксиального выращивания слоев GaAs.

После загрузки подложек в реактор, вся система установки проверяется на герметичность. Для этого проводится откачка установки форвакуумным насосом и заполнение ее водородом до давления несколько выше атмосферного. Затем устанавливается поток водорода и начинается нагрев подложек. При достижении 400°C в систему подается арсин концентрацией 0,2% в водороде для предотвращения испарения мышьяка с поверхности подложки. Для удаления собственного окисла подложки подвергаются отжигу при 670°C в течение 5 мин.

Для проведения процесса роста эпитаксиального слоя GaAs в реактор подаются потоки МОС и арсина в заданном соотношении. Время проведения процесса роста определяется получением необходимой толщины эпитаксиального слоя, после чего подача МОС в реактор прекращается. В течение 1-2 мин. Проводится продувка газовой системы и затем начинается снижение температуры до 400°C. При температурах менее 400°C подача арсина в систему прекращается и дальнейшее охлаждение подложки до комнатной температуры проводится в потоке водорода.

Толщина выращенных слоев h определяется **весовым методом**, который заключается в измерении веса подложки до и после выращивания пленки с помощью высокоточных весов АДВ-200М и толщины подложки H индикатором МИГ-1 с ценой деления 1мкм. Расчет проводится по формуле:

$$h = H \Delta M / M,$$

где ΔM – привес подложки после выращивания.

Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство и принцип действия технологической установки. Ознакомиться с техническим описанием ее комплектующих частей: палладиевого очистителя водорода, регулятора расхода газов, барбатера для МОС, устройства регулировки температуры.
2. Рассчитать необходимую для роста пленки GaAs или квантоворазмерной структуры концентрацию компонент-источников в потоке водорода и соответствующие значения потоков газов через регуляторы расхода газов.
3. Составить программу управления технологическим процессом роста для компьютера.
4. Подготовить подложку GaAs и загрузить ее в реактор.
5. Вырастить требуемую структуру, определить толщину выращенного эпитаксиального слоя и исследовать ее свойства.

Литература

Основная:

1. Л.Ченг, К.Плог. Молекулярно-лучевая эпитаксия. М.: Мир, 1989.
2. C.Weisbuch, B.Vinter. Quantum semiconductor structures. Fundamentals and applications. Academic Press, 1991.
3. М.Херман. Полупроводниковые сверхрешетки. М.: Мир, 1979.

Контрольные вопросы

1. Основные механизмы эпитаксии.
2. Характеристика источников химических элементов для выращивания GaAs и химические реакции.
3. Требования к термодинамическим условиям в реакторе.
4. Расчет потоков газов-источников элементов, необходимых для роста пленок.
5. Основные методы очистки газов и их характеристика.
6. Общие принципы легирования слоев. Источники легирующей примеси.
7. Влияние легирующей примеси на морфологию поверхности.
8. Гетероэпитаксия. Принцип выбора пар контактирующих материалов.
9. Связь между технологическими параметрами и качеством эпитаксиального слоя.
10. Дефекты в эпитаксиальных слоях.

Приложение 1.

Техника безопасности.

1. Установка МОС-гидридной эпитаксии относится к категории взрыво- и огнеопасных, а также опасных с точки зрения токсичности в связи с использованием в технологическом процессе гидридов, металлоорганических соединений и водорода. По электрической безопасности она представляет собой экспериментальную технологическую установку с напряжением до 1000 В.

В связи с этим во время обучения студент обязан изучить инструкцию по эксплуатации данной установки, инструкции по технике безопасности при работе с водородом, гидридами и МОС и правила технической эксплуатации электроустановок с напряжением до 1000 В.

2. Во время работы на установке должны соблюдаться следующие правила:

- обучающийся студент может производить оперативные переключения и другие работы только с разрешения и под надзором руководителя;
- работа на установке разрешена только при включенной вентиляции;
- для предотвращения образования взрывоопасных смесей и МОС с воздухом, а также для проверки герметичности установки произвести откачку реактора и подводящих трубопроводов форвакуумным насосом с масляной ловушкой;
- перед подачей напряжения на нагреватель реактора включить водяное охлаждение фланцев реактора для предотвращения разгерметизации системы из-за перегрева тефлоновых прокладок. При прекращении подачи воды работа должна быть остановлена;
- по окончании процесса роста закрыть баллоны с гидридами и вентили на испарителях (барбатерах) с МОС, продуть газовую систему в течение 5 мин. для удаления токсичных продуктов и откачать установку на форвакуум.