

УДК 681.3:539.2

Система автоматизации модуля роста пленок установки молекулярно-пучковой эпитаксии. Мезин Н.Н. // Научное приборостроение. Приборы и средства автоматизации для научных исследований. Л.: Наука, 1987, с. 76-82.

Рассматривается система автоматизации, которая обеспечивает решение задач управления и контроля функционирования аналитической части модуля роста пленок при его проверке, подготовке к работе и выращивания пленочных структур. Результаты эксплуатации показывают, что система позволяет проводить исследования особенностей технологического процесса роста пленок. Лит. - 4 назв., ил. - 1.

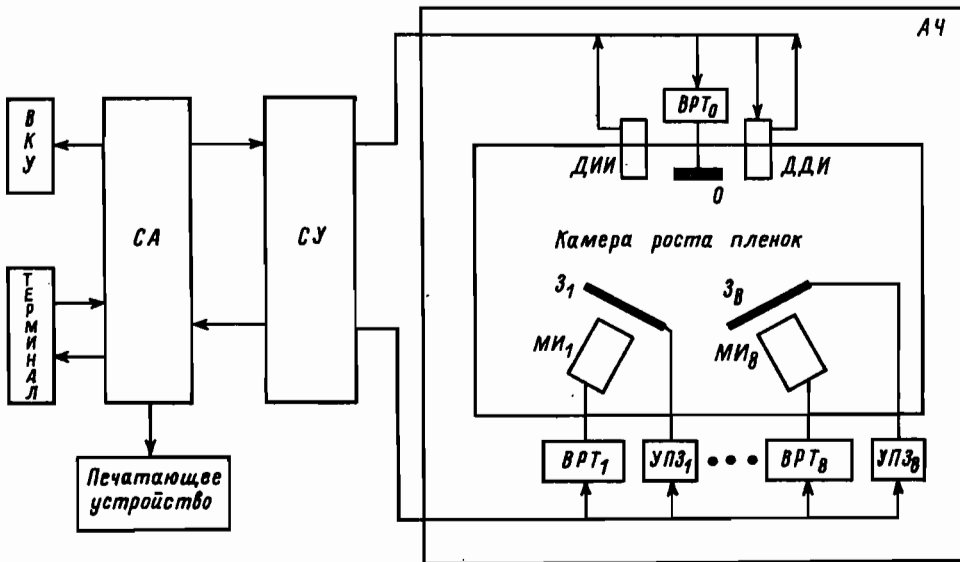
СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ МОДУЛЯ РОСТА ПЛЕНОК УСТАНОВКИ  
МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ

Метод молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) основан на конденсации на разогретом основании (образце) в условиях высокого вакуума направленных атомных или молекулярных пучков, полученных в результате нагрева различных веществ [1]. Установка МПЭ, в которой используется метод, обеспечивает возможность выращивания в контролируемых условиях и исследования полупроводниковых пленочных структур. Сложность задач управления и контроля функционирования установки при подготовке ее к работе и в процессе выращивания таких структур требует разработки специальных систем автоматизации (СА).

1. Назначение

СА модуля роста пленок установки МПЭ предназначена для решения задач управления и контроля функционирования аналитической части (АЧ) модуля при его проверке, подготовке к работе и при выращивании пленочных структур.

Структура модуля роста пленок представлена на рис.1. Кроме АЧ и СА в него



Структура модуля роста пленок.

входит система управления (СУ).

2. Состав и принципы работы АЧ и СУ

АЧ модуля включает в себя:

- восемь молекулярных источников (МИ) с высокоточными регуляторами температуры (ВРТ);
- образец (0) с ВРТ;
- восемь заслонок (З) с механизмами управления положением заслонок (УПЗ);

датчик интегральной абсолютной интенсивности (ДИИ) молекулярных пучков МИ, падающих на образец;

датчик дифференциальной (по массам) относительной интенсивности (ДДИ) молекулярных пучков МИ в области образца.

Все МИ вместе с заслонками, а также образец, ДИИ и ДДИ размещены в камере роста пленок, в которой поддерживается вакуум  $10^{-8}$  Па.

МИ состоит из тигля цилиндрической формы, который содержит навески одного или двух различных веществ. НРТ обеспечивает нагревание МИ до температур перехода веществ МИ в парообразное состояние с давлением паров, достаточным для выхода из отверстия тигля МИ молекулярного пучка. Диаграмма направленности пучка определяется формой тигля и степенью заполнения его веществом [2, 4]. Интенсивность молекулярного пучка, а следовательно, и параметры напыляемой пленки зависят от температуры нагрева МИ, лежащей в некотором диапазоне температур, определяемом веществом источника. Температуры нагрева МИ изменяются от минимальной 350 °С для флюората до максимальной 1300 °С для алюминия [2]. Конструктивно МИ расположены таким образом, что максимум диаграмм направленности их молекулярных пучков сосредоточены на образце.

Заслонки З предназначены для перекрытия молекулярных пучков МИ и управляются независимо друг от друга при помощи механизмов УПЗ. Каждая заслонка может находиться в одном из двух фиксированных положений – открыта или закрыта. В соответствии с этим разогретый до температуры из рабочего диапазона и заполненный веществом МИ может быть "включен" (заслонка источника открыта, молекулярный пучок достигает образца) или "выключен" (заслонка источника закрыта, молекулярный пучок не достигает образца). При открывании и закрывании заслонок МИ на образце появляются температурные скачки, которые могут достигать величины 20 °С [3]. Такие же скачки образуются на МИ, у которых изменяется положение заслонок. Это явление сопровождается изменением интенсивности молекулярных пучков включаемых источников и условий роста пленки на образце, что необходимо учитывать при управлении ростом пленочных структур.

Процессы, сопровождающие рост пленок, требуют нагревания образца. Для этого образец снабжается НРТ, который обеспечивает его разогрев до необходимой температуры.

Выращиваемая на образце пленочная структура представляет собой упорядоченную последовательность слоев. Слоем называется пленка, получаемая на образце в процессе роста, при неизменном в течение некоторого интервала времени Т положении заслонок МИ и постоянном в этом интервале времени законе изменения интенсивности молекулярных пучков на каждом из включенных источников. Интервал времени Т называется временем роста слоя. Температура образца в процессе роста слоя не меняется.

Информация, получаемая с ДИИ и ДДИ, обеспечивает СА данными об абсолютной интенсивности и процентном составе молекулярных пучков в области образца. Конструктивно ДИИ и образец О размещены таким образом, что в рабочем положении может находиться либо образец, либо ДИИ. Следовательно, в процессе выращивания пленоч-

ной структуры, когда в рабочем положении находится образец, информация с ДДИ отсутствует и для оценки процентного состава молекулярных пучков в области образца используются данные с ДДИ. При подготовке модуля роста пленок к работе на место образца устанавливается ДДИ, а информация, получаемая с него, используется для формирования калибровочных характеристик МИ.

СУ представляет собой аппаратный интерфейс между АЧ и ЭВМ, на которой реализована СА, и выполнена в стандарте КАМАК. В состав СУ входят следующие основные модули:

- цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) управления ВРТ;
- модуль обмена данными (МОД), управляющий положением заслонок;
- цифровой генератор напряжения (ЦГН) управления ДДИ;
- многоканальный аналого-цифровой преобразователь (МАЦП) преобразования информации с ДДИ и ДДИ.

Кроме перечисленных, СУ включает в себя ряд дополнительных вспомогательных модулей, а также модуль управления видео-контрольным устройством (ВКУ) отображения цветной графической информации.

### 3. Задачи, решаемые СА

СА модуля роста пленок в процессе своей работы решает задачи управления и контроля функционирования АЧ модуля при его проверке, подготовке к работе и выращивании пленочных структур. При этом СА с помощью СУ формирует сигналы управления ВРТ, механизмами УПЗ и ДДИ и, при необходимости, запрашивает информацию от ДДИ и ДДИ.

При проверке функционирования модуля роста пленок СА обеспечивает решение задач:

- управления температурами МИ и образца;
- управления положением заслонок МИ;
- регистрации и отображения показаний ДДИ и ДДИ.

Требуемое положение заслонок и значения температур задаются оператором. СА обеспечивает отображение корректности выполнения перечисленных операций и состояния элементов АЧ после их выполнения.

При подготовке модуля роста пленок к работе СА решает задачи:

- формирования базы данных (БД);
- первичной калибровки МИ и процесса нагревания образца;
- снятия спектров масс остаточных газов в камере роста пленок;
- отображения в различных режимах спектров масс остаточных газов на экране ВКУ.

Результаты, полученные при решении перечисленных задач, обеспечивают СА данными, необходимыми для управления процессами роста пленок.

При управлении ростом пленочных структур СА обеспечивает решение следующих задач:

- контроль полноты и непротиворечивости описаний, относящихся к выращиваемой структуре;
- технологическая подготовка МИ, необходимых для выращивания структуры, к основному режиму работы;
- подготовка информации о текущих значениях калибровочных параметров, требуемых для роста структуры МИ;
- вторичная калибровка указанных оператором МИ с целью уточнения их текущих

калибровочных параметров;

технологическая подготовка образца;

формирование программ управления АЧ модуля при росте отдельных слоев структуры;

технологическая подготовка МИ и образца к выращиванию слоя;

управление заслонками и температурами МИ и образца при реализации программы роста слоя;

контроль процентного состава выращиваемого слоя по информации, поступающей с ДДИ;

отображение процесса роста структуры на терминале ЭВМ и ВКУ;

протоколирование процесса роста структуры с помощью печатающего устройства ЭВМ;

выключение и охлаждение МИ и образца по заданной программе после завершения роста пленочной структуры.

#### 4. Структура программного обеспечения СА

СА модуля роста пленок реализована в виде специального программного обеспечения (ПО), которое предназначено для решения перечисленных задач. ПО СА включает в себя следующие основные элементы:

инициатор СА,

БД СА с системой управления БД (СУБД),

подсистемы, реализующие решение задач управления и контроля.

Инициатор СА обеспечивает подготовку ПО СА и модулей КАМАК СУ к работе. Запуск инициатора СА выполняется оператором в начале работы с модулем роста пленок.

БД СА с СУБД предназначена для ввода, хранения, выборки и модификации описаний параметров выращиваемых структур и отдельных слоев, калибровочных характеристик элементов АЧ, описания конфигурации модулей КАМАК СУ, спектров масо остаточных газов в камере роста пленок и различной справочной информации.

При выделении в ПО подсистем использован функциональный принцип разбиения.

Каждая выделенная подсистема предназначена для решения некоторого подмножества функционально связанных задач.

ПО СА обеспечивает диалоговый режим работы. Диалоговая система (ДС) распределена по подсистемам так, что каждая подсистема содержит только необходимые для ее работы компоненты ДС. ДС запускается начальным инициатором СА и до завершения работы СА является инициатором диалога.

ДС организует диалог типа меню с определенным при проектировании СА уровнем вложенности по глубине. В ДС предусматривается три типа запросов: меню; альтернатива; значения параметра. Все запросы-меню ДС спроектированы таким образом, что выбор оператора ограничен только допустимыми в данной ситуации действиями. Запрос-альтернатива рассматривается как частный случай запроса-меню, имеющего два выхода. При запросе значения параметра ДС информирует оператора об области его допустимых значений и контролирует принадлежность полученного от оператора значения этой области. При вводе недопустимого значения запрос повторяется. Аналогичный контроль на допустимость ответа оператора выполняется и при анализе ответов в запросе-меню.

Рассмотренная структурная организация ПО СА обеспечивает за счет:

функционального разбиения ПО на подсистемы возможность развития отдельных подсистем, а также введения новых функциональных подсистем при развитии или модификации АЧ;

распределения ДС по подсистемам возможность развития существующих и введения новых компонент ДС совместно с развитием и введением новых подсистем; способа организации диалога и метода обработки ответов оператора защиту СА и процессов управления АЧ от ошибочных действий оператора.

#### 5. Работа с СА

При работе с СА выделяются пять основных режимов:

формирование в БД СА описаний параметров слоев, структур и конфигурации модулей КАМАК СУ;

первичная калибровка МИ и процесса нагревания образца;

снятие и отображение в различных режимах спектров масс остаточных газов в камере роста пленок;

управление процессом выращивания структуры и контроль АЧ;

проверка функционирования СУ и АЧ.

Каждому режиму соответствует одна или несколько подсистем ПО СА. Рассмотрим подробнее выделенные режимы работы СА.

Режим формирования описаний предназначен для ввода в БД СА и редактирования описаний:

параметров выращиваемых слоев;

компенсирующих температурных скачков для МИ и образца;

законов изменения интенсивностей молекулярных пучков МИ в слое;

последовательностей слоев в структуре;

конфигурации модулей КАМАК СУ.

Выполнение режима не требует взаимодействия с АЧ.

Режим первичной калибровки предназначен для получения зависимостей абсолютной интенсивности молекулярного пучка МИ, падающего на образец, от кода, установленного на ЦАП соответствующего МИ

$$INT = f_i(CC), \quad i = 1, \dots, 8, \text{ где}$$

$i$  – номер МИ;  $INT$  – абсолютная интенсивность молекулярного пучка МИ, падающего на образец;  $CC$  – код, устанавливаемый на ЦАП соответствующего МИ, и температуры образца от кода, установленного на ЦАП образца  $TEM = f_0(CC)$ , где  $TEM$  – температура образца;  $CC$  – код, устанавливаемый на ЦАП образца.

Процесс получения первой зависимости называется первичной калибровкой МИ, второй – первичной калибровкой процесса нагревания образца. Режим выполняется совместно с СУ, АЧ и с использованием ДДИ. Полученные зависимости заносятся в БД СА в табличной форме с переменным шагом изменения аргумента. При реализации зависимостей используется линейная интерполяция.

Режим снятия и отображения спектров предназначен для получения и последующего отображения в различных режимах на экране ВКУ спектров масс остаточных газов в камере роста пленок. Полученные данные могут быть использованы для контроля вакуума в камере. Режим выполняется совместно с СУ, АЧ и с использованием ДДИ. В процессе снятия спектра получаемая информация динамически отображается на экране ВКУ и заносится в БД СА.

Режим управления процессом выращивания структуры предназначен для получения пленочных структур. Режим выполняется совместно с СУ, АЧ и с использованием ДДИ.

Собственно выращивание структуры начинается после подготовительных этапов, предназначенных для технологической и программной подготовки АЧ и СА. К подготовительным этапам относятся:

контроль полноты и непротиворечивости описаний, относящихся к выращиваемой структуре,

технологическая подготовка МИ, необходимых для выращивания структуры, к основному режиму работы,

подготовка информации об отклонении текущих калибровочных параметров МИ, необходимых для выращивания структуры, от значений, полученных при первичной калибровке МИ и проведение вторичной калибровки указанных оператором МИ,

технологическая подготовка образца.

В случае некорректного завершения любого из подготовительных этапов СА аварийно заканчивает работу в режиме управления процессом выращивания структуры с выводом на терминал ЭВМ соответствующих диагностических сообщений.

Управление процессом выращивания структуры заключается в последовательной обработке описаний требуемых слоев, формировании и реализации программ их роста.

Обработка включает в себя следующие этапы:

формирование программы роста слоя,

технологическая подготовка МИ и образца к росту слоя,

вывод протокола роста слоя на печатающее устройство ЭВМ,

реализация программы роста слоя.

Первые три этапа являются подготовительными к процессу роста, который выполняется на четвертом этапе. В процессе реализации программы роста слоя формируются сигналы управления АЧ, в результате чего отрабатываются компенсирующие температурные скачки на МИ и образце и заданные законы изменения интенсивностей молекулярных пучков на включенных МИ. Время реализации программы роста слоя соответствует заданному времени роста слоя. В процессе роста по информации, получаемой с ДДИ, оценивается процентный состав выращиваемой пленки.

Процесс выращивания структуры завершается выключением и охлаждением МИ и образца по программам, аналогичным программам роста слоя.

## 6. Основные характеристики ПО СА

ПО СА реализовано на ЭВМ СМ-1300 в среде операционной системы ОС РВ 2.1.

ПО СА обеспечивает число:

описаний различных слоев - до 20;

описаний компенсирующих температурных скачков - до 100;

описаний законов изменения интенсивности - до 5;

слоев в структуре - до 200.

ПО разработано с использованием языков программирования ФОРТРАН и АССЕМБЛЕР. Общее число программ - около 100 с числом операторов около 5500.

В настоящее время описанная СА проходит опытную эксплуатацию в составе установки МПЭ. Результаты эксплуатации показывают, что система обеспечивает решение задач управления и контроля функционирования АЧ установки МПЭ и позволяет проводить исследования особенностей технологического процесса роста пленок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Dohler G.H., Ploog K. // *Progr. Crystal Growth Charact.*, 1979, V.2, p. 145-168.
2. Luscher P.E., Collins D.M. // *Progr. Crystal Growth Charact.*, 1979, V.2, p.15-32.
3. Соколов Л.В., Ламин М.А. // *Поверхность*, 1985, № 9, С.75-80.
4. Herman M.A. // *Vacuum*, 1982, V.32, N9, p. 555-565.

Н.Н.Межин ( НТО АН СССР )

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ МОДУЛЯ РОСТА ПЛЕНОК

Модуль роста пленок входит в состав установки молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), предназначенной для выращивания в контролируемых условиях и исследований полупроводниковых пленочных структур. Система автоматизации (СА), рассмотренная в предыдущей статье, реализована в виде специального программного обеспечения (ПО).

#### 1. Структура ПО СА

ПО СА реализовано в среде операционной системы ОС РВ 2.1. Основу ПО составляют подсистемы, которые оформлены в виде набора задач.

Инициатор СА предназначен для подготовки ПО СА и модулей КАМАК СУ к функционированию и запускается оператором установки МПЭ в начале работы с модулем роста пленок. После запуска инициатор СА последовательно выполняет следующие действия:

1) устанавливает в управляющей программе операционной системы (УП ОС) параметры разделяемой общей области и задач ПО СА. Разделяемая общая область представляет собой некоторую область оперативной памяти вычислительной машины, на которой реализована СА, имеющую определенную при проектировании ПО СА структуру и не меняющую своего содержимого при переходе от задачи к задаче. Включенные в структуру области переменные могут использоваться последовательно несколькими задачами ПО;

2) выполняет задачу начальной установки и контроля функционирования модулей КАМАК СУ;

3) формирует на экране терминала ЭЕМ запрос-меню выбора режима работы модуля роста пленок (подсистемы);

4) вводит и анализирует ответ оператора;

5) в зависимости от ответа оператора запускает задачу или последовательность задач, реализующих работу с модулем в выбранном режиме;

6) при необходимости завершения работы с модулем роста пленок запускает задачу выключения АЧ модуля;

7) в случае ввода ошибочного ответа информирует об этом оператора и повторяет формирование запроса-меню выбора режима работы.

Перед запуском задач ПО СА, обеспечивающих взаимодействие с АЧ модуля роста пленок, инициатор СА предварительно запускает вспомогательную задачу, которая анализирует описанную в СА конфигурацию модулей КАМАК СУ и записывает в разделяемой общей области их параметры.

Выделенные в ПО СА подсистемы предназначены для управления модулем при проверке его функционирования, подготовке к работе и выращивании пленочных структур.