

УДК [536.42+532.64]:539.216.2

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ

И. П. Казаков<sup>1</sup>, В. И. Цехош<sup>1</sup>, М. Е. Игонин<sup>2</sup>, Л. А. Фофанова<sup>2</sup>,  
С. Н. Шемякин<sup>2</sup>

*Разработана автоматическая система управления для эпитаксиальных установок на базе программного обеспечения и аппаратных средств фирмы Advantech.*

**Ключевые слова:** автоматическая система управления, выращивание полупроводниковых гетероструктур, эпитаксия.

Установки молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) представляют собой сложный комплекс технологического оборудования для выращивания в сверхвысоком вакууме многослойных гетероструктур полупроводников, которые составляют основу для изготовления транзисторов, лазеров и другой твердотельной элементной базы электроники, оптоэлектроники и микромеханики. На сегодняшний день МПЭ является наиболее совершенным среди эпитаксиальных методов выращивания слоёв, позволяющим достигать точность по толщине на уровне одного атомного слоя. Сложность конструкции электронных приборов, а значит и гетероструктур, из которых их изготавливают, постоянно возрастает. Количество слоёв разного состава в некоторых современных гетероструктурах может достигать нескольких сотен. Поэтому установки МПЭ зарубежного производства уже более 30 лет оснащаются автоматической системой управления (АСУ). Отечественное машиностроение в этой области сильно отстало и установки МПЭ, автоматизированные на современном уровне, стали выпускаться только в последние несколько лет (например, ЗАО “Научное и технологическое оборудование” в г. С.-Петербурге).

В научных организациях страны существует значительный парк отечественных установок МПЭ, выпущенных в 80–90 годы, которые находятся в работоспособном состоянии и могут ещё долго и успешно использоваться при условии их модернизации, важнейшим этапом которой является автоматизация. Эта работа имеет смысл, т.к. новая установка МПЭ самой бюджетной категории – “для лабораторных исследований”

<sup>1</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН.

<sup>2</sup> Саратовский научно-исследовательский институт машиностроения.

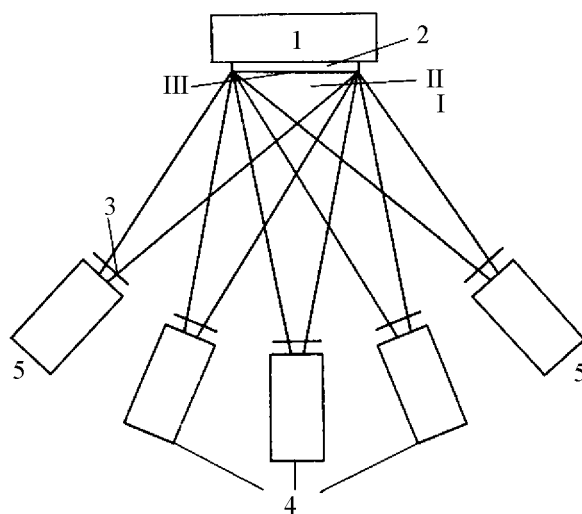


Рис. 1: Схема установки молекулярно-пучковой эпитаксии [1]. Границы рисунка – границы ростовой сверхвысоковакуумной камеры. I – зона создания молекулярных пучков, II – зона смешивания молекулярных пучков, III – зона кристаллизации (поверхность подложки). 1 – нагреватель подложки, 2 – подложка, 3 – заслонка молекулярного источника, 4 – молекулярные источники основных элементов получаемых структур, 5 – молекулярные источники легирующих элементов.

– стоит более одного миллиона евро. Специализированные АСУ для установок МПЭ зарубежного производства весьма дороги сами по себе, а с учётом несовместимости аппаратных средств стоимость такой модернизации становится сравнима со стоимостью новой установки. Поэтому пользователи автоматизируют такие установки своими силами, что является наиболее дешёвым вариантом, но и, как правило, достаточно примитивным. Приемлемым альтернативным решением является профессиональная отечественная разработка системы управления, использующая специализированное математическое обеспечение и аппаратные средства западного производства.

В настоящей работе кратко описана такая АСУ, созданная на базе программного обеспечения и промышленного персонального компьютера фирмы Advantech – мирового лидера в области промышленной автоматизации. Техническое задание на разработку АСУ для установки Цна-25 были сформулированы в Отделении физики твёрдого тела ФИАН. Разработка, изготовление и монтаж АСУ были произведены Саратовским научно-исследовательским институтом машиностроения (ОАО «СНИИМ-28»).

*Принцип работы установки МПЭ и функции АСУ.* Технологический процесс МПЭ представляет собой осаждение тонких плёнок и их композиций – гетероструктур – из паров различных исходных химических элементов в сверхвысоком вакууме (рис. 1). Поток пара каждого элемента создаётся отдельным молекулярным источником. В силу малой плотности пара и отсутствия соударений молекул в нём, а также благодаря коллимации, обеспечиваемой конструкцией источника, поток вылетающих из его апертуры молекул распространяется в виде пучка, направленного на подложку. Термин “эпитаксиальный” означает, что кристаллическая структура формируемых слоёв наследуется от исходной монокристаллической пластины – подложки, на которой конденсация паров и происходит. Состав каждого слоя гетероструктуры определяется соотношением интенсивностей молекулярных потоков, падающих на подложку. Интенсивность потока задаётся температурой исходного вещества, помещённого в молекулярный источник. С помощью заслонки, перекрывающей выходную апертуру источника, молекулярный поток может резко “включаться” и “выключаться”. Таким образом, управление составом выращиваемой гетероструктуры достигается регулированием температур молекулярных источников и установкой их заслонок в одно из двух фиксированных положений “открыто–закрыто”.

Важнейшим параметром технологического процесса является температура подложки, т.к. формирование кристаллической структуры растущего слоя во многом определяют диффузионные и химические процессы, происходящие на её поверхности. Для повышения однородности свойств гетероструктуры по площади подложки, во время осаждения слоёв её вращают, причём стараются подбирать частоту вращения так, чтобы один атомный слой вещества осаждался за один оборот. Поддерживать и менять по определённой программе температуры молекулярных источников и подложки, а также положение заслонок и скорость вращения подложки – есть основные функции АСУ установок МПЭ. Могут быть ещё и второстепенные функции, такие как перевод установки в безопасный режим функционирования в случае нештатных ситуаций и оповещение об их возникновении; архивирование данных, контроль различных датчиков и устройств вспомогательных систем, например, вакуумной и т.д.

*Установка МПЭ типа Цна-25.* АСУ разрабатывалась для установки МПЭ типа Цна-25 производства Научно-исследовательского технологического института (НИТИ, г. Рязань). Установка Цна-25 выпуска 1992 г. – наиболее совершенная установка МПЭ, разработанная в нашей стране в советский период и, в целом, концептуально соответствует современным конструкторским решениям. За время эксплуатации на ней были

получены достаточно высокие результаты, и поэтому её модернизация имела веские основания.

Установка Цна-25 предназначена для выращивания эпитаксиальных гетероструктур на основе арсенида галлия. Осаждение исходных веществ, например, галлия и мышьяка, происходит из молекулярных источников на нагреваемую подложку в вакууме  $10^{-7}$  –  $10^{-8}$  Па. Всего в установке имеется восемь молекулярных источников.

Молекулярный источник представляет собой тигель из нитрида бора диаметром 21 и длиной 100 мм с танталовым нагревателем мощностью около 200 Вт, помещённым в экранно-вакуумную изоляцию. Перед выходным отверстием тигля расположена заслонка, имеющая два фиксированных положения “открыто–закрыто”.

Нагреватель подложки мощностью около 400 Вт изготовлен в виде ленточной спирали из тантала, помещённой в экранно-вакуумную изоляцию. Перед подложкой расположена заслонка, имеющая два фиксированных положения “открыто–закрыто”. Температуры молекулярных источников и нагревателя подложки измеряются термомпарами типа ВР градуировки № 1. Подложка вращается над неподвижным нагревателем с заданной частотой, которая может выбираться в диапазоне 1–60 об/мин. Привод заслонок и вращение подложки осуществляется от шаговых двигателей типа ДШИ-200. Температура подложки в диапазоне 450–850 °С измеряется пирометром М680 фирмы “Micron” с аналоговым выходом и двунаправленным компьютерным каналом передачи данных RS232.

Давление в камере роста измеряется непрерывно с помощью вакуумметров ВИ-14 и ВМБ-1/8 001. Повышение давления в камере роста выше заданного фиксируется сигналом от блокировки вакуумметра ВМБ-1/8 001. Падение давления воды в системе охлаждения фиксируется сигналом от манометра ЭКМ-IV.

Установка Цна-25 имела штатную АСУ, которая, обладая неплохими параметрами, работала очень ненадёжно из-за отказов электроники. По прошествии шести лет эксплуатации штатная АСУ потеряла работоспособность окончательно, что, впрочем, не противоречило заявленному изготовителем ресурсу, который составлял также шесть лет. Ремонт был невозможен, т.к. вся аппаратная часть АСУ, включая аналоговые регуляторы температуры, блоки питания нагревателей, материнская плата управляющего компьютера и другие цифровые устройства, была собственной разработки НИТИ, который к этому моменту практически перестал существовать.

*Особенности разработанной АСУ.* Перед проектировщиками была поставлена задача осуществить разработку АСУ на основе лицензионного программного обеспече-

ния и высококачественных аппаратных средств с максимальным использованием стандартных комплектующих. Это позволяло решить важнейшую проблему ремонта, которая для отечественных разработок носит драматический характер ввиду значительного объёма применяемых нестандартных технических решений и текучести кадров разработчиков. В результате была создана недорогая (по сравнению с коммерческими западными) АСУ, которая может быть легко адаптирована к любым установкам для выращивания кристаллов и плёнок. Аппаратное обеспечение было спроектировано на базе стандартных комплектующих фирмы Advantech, что давало возможность ремонтировать его и без привлечения разработчиков. Разработка программного обеспечения АСУ была выполнена в программном пакете GeniDAQ той же фирмы.

Не вдаваясь в технические подробности построения АСУ, рассмотрим некоторые особенности, важные с точки зрения пользователя. АСУ обеспечивает выполнение следующих функций:

1. Проведение процесса эпитаксии длительностью до 120 ч в автоматическом и ручном режимах управления. Поддержание заданных температур в обоих режимах осуществляется автоматически.

2. Проведение процесса эпитаксии в автоматическом режиме по заранее заданной программе, включающей временные зависимости температуры восьми молекулярных источников и нагревателя подложки, состояний их заслонок, а также частоты вращения подложки.

3. Отображение на экране монитора и архивирование параметров текущего технологического процесса, а также величину их отклонений от заданных значений. Периодичность регистрации параметров может задаваться программой в диапазоне 1–60 с дискретностью 1 с.

4. Снятие питания с нагревателей молекулярных источников и нагревателя подложки в случае разрыва цепей их терморпар.

5. Включение визуальной и звуковой сигнализации в следующих случаях:

– отклонение температур молекулярных источников и нагревателя подложки более чем на 2–20 °С от заданных по программе. Величина отклонения переменная и задаётся программой с дискретностью 1 °С;

– включение или выключение вращения подложки, несанкционированное программой;

– несовпадение положений девяти заслонок с заданными по программе;

– падение давления воды в системе охлаждения (сигнал от манометра ЭКМ-IV);

– повышение давления в камере роста выше заданного (сигнал от вакуумметра ВМБ-1/8 001).

Программное обеспечение АСУ позволяет составлять программу технологического процесса, удовлетворяющую следующим требованиям:

- задание не менее 50 участков кривых изменения температуры в одном канале;
- проведение до 500 циклов переключений на канал (открывание и закрывание заслонок молекулярных источников и нагревателя подложки) за один процесс;
- изменение задания частоты вращения подложки за один процесс не менее 10 раз;
- диапазон задания скорости изменения температуры – 0.5–100 °С/мин;
- дискретность индикации и регистрации температур молекулярных источников и нагревателя подложки – 0.1 °С.

*Пользовательский интерфейс АСУ.* АСУ может работать в двух режимах – автоматическом и ручном. В автоматическом режиме установка работает по заданной программе, которая составляется в редакторе Excel в виде таблицы. Файл с программой загружается и после запуска технологического процесса какие-либо изменения в программе невозможны до его окончания.

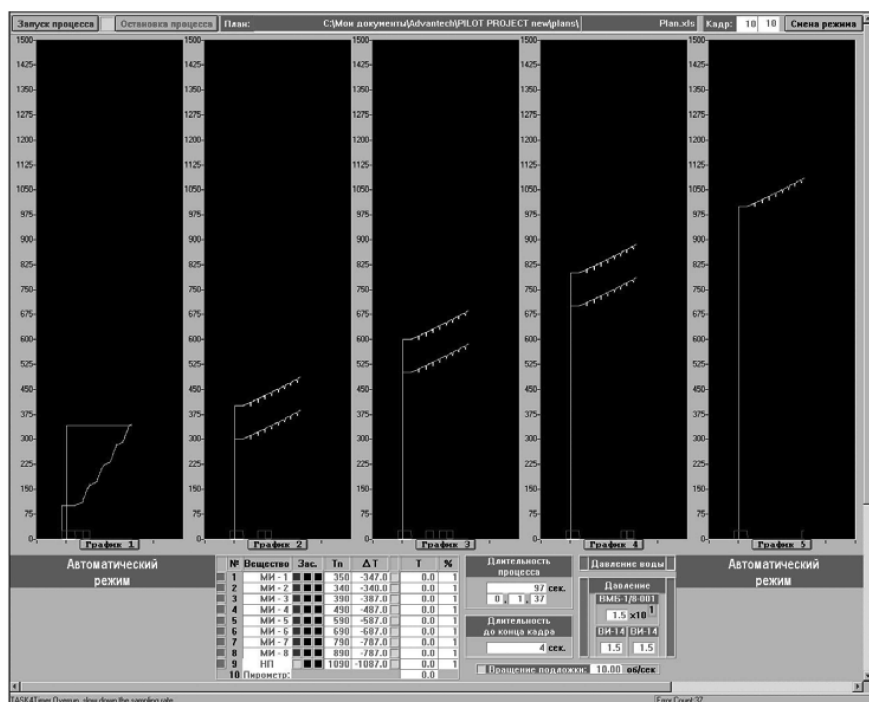


Рис. 2: Изображение экрана “Автоматический режим”.

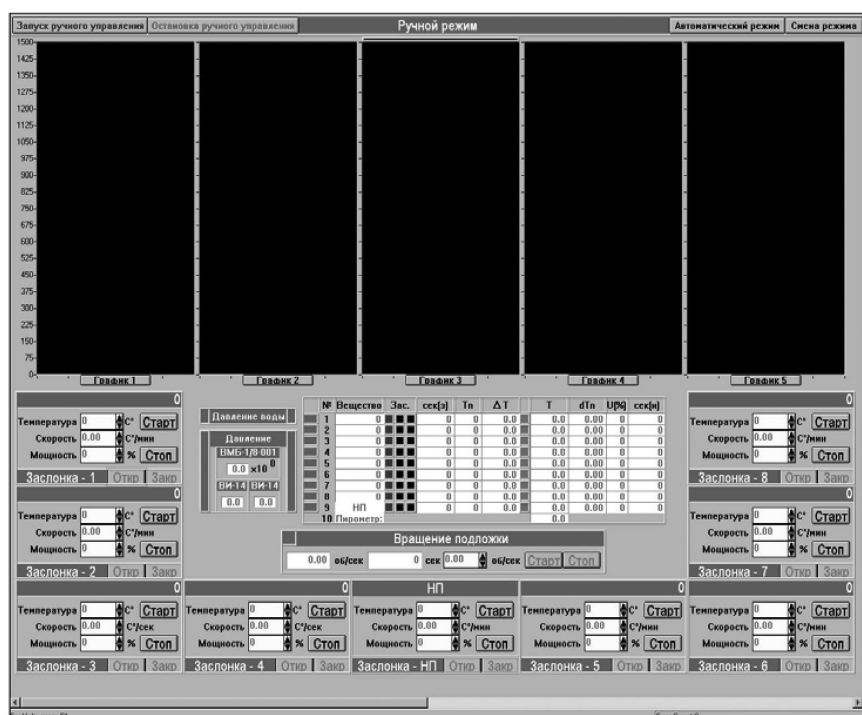


Рис. 3: Изображение экрана “Ручной режим”.

В автоматическом режиме на экране монитора представлена вся информация о ходе выполнения программы технологического процесса (рис. 2). В каждом из пяти стационарных окон-графиков выводятся результаты измерения температуры и информация о положении заслонок в двух каналах, а также заданные по программе значения. Эти данные продублированы в таблице, расположенной в нижней части экрана. В отдельных окнах выведена дополнительная информация о текущем состоянии программы, давлении в ростовой камере, вращении подложки. Аналогично выглядит экран “Ручной режим” (рис. 3), на котором предусмотрена возможность задания температурных режимов для каждого молекулярного источника и подложки, состояния каждой заслонки и режима вращения подложки.

Специальный экран “Настройки” предназначен для введения различных параметров системного характера, которые не записываются в тексте каждой программы технологического процесса и используются по умолчанию. Например, это настройки регуляторов температуры.

Каждый канал управления температурой включает в себя виртуальный пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор, позволяющий задавать параметры закона регулирования в широких пределах. Предусмотрена регулировка

частоты питания шаговых двигателей приводов заслонок молекулярных источников. Есть возможность отключения блокировок и звуковых сигналов оповещения о нештатных ситуациях и т.д.

В целом пользовательский интерфейс очень удобен, за исключением одного существенного момента. В рамках пакета GeniDAQ не удалось реализовать возможность изменения программы технологического процесса после того, как она запущена. Такая функция весьма полезна с учётом необходимости коррекции при большой длительности процесса МПЭ.

*Заключение.* За время эксплуатации АСУ на установке Цна-25 были выращены около 150 гетероструктур на основе GaAs, AlGaAs, InGaAs. После устранения некоторых программных недоработок АСУ работала надёжно и, в целом, соответствовала заложенным в ТЗ требованиям. Это позволило получать эпитаксиальные слои с точностью по толщине до одного монослоя.

Таким образом, в настоящей работе описан положительный опыт автоматизации установки молекулярно-пучковой эпитаксии. АСУ, созданная на базе программного обеспечения и аппаратных средства фирмы Advantech, является доступной альтернативой специализированным АСУ для установок МПЭ зарубежного производства.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] М. А. Нерман, Vacuum **32**, 555 (1982).

Поступила в редакцию 29 марта 2010 г.