

УДК 681.324

Д. В. Булавский, В. Е. Зюбин, Н. Н. Карлсон, В. О. Криворучко,
В. В. Мионов

(Новосибирск)

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Рассматривается реализация цифровой распределенной мультипроцессорной системы управления установкой для выращивания монокристаллов кремния диаметром до 250 мм методом вытягивания из расплава. Излагаются основные принципы построения и инженерные решения, использованные при создании аппаратной части и программного обеспечения системы управления.

Введение. Задачи автоматизации сложных объектов предъявляют разработчикам комплекс жестких требований, включающий требования по помехозащищенности, надежности, технологичности, времени восстановления, эргономичности, стоимости и т. д.

Установка для выращивания монокристаллов кремния (УВМК) методом вытягивания из расплава (метод Чохральского [1]) как объект управления имеет следующий ряд основных специфических особенностей:

1. Относительно большое число разнородных цифровых и аналоговых сигналов, что подразумевает сложный алгоритм управления, а следовательно, требует большой производительности вычислительных средств и гибкости программного обеспечения.

2. Эксплуатация в тяжелых условиях цеха промышленного предприятия.

3. Низкий уровень компьютерной подготовки обслуживающего персонала, предполагающий простой, дружелюбный и эффективный пользовательский интерфейс.

4. Необходимость бесконтактного измерения параметров выращиваемого кристалла оптическими методами с последующей обработкой в реальном времени значительного объема информации.

5. Отсутствие теории, объясняющей взаимозависимость параметров процесса выращивания, вследствие чего использование УВМК в качестве экспериментальной требует измерения и регистрации большого числа параметров технологического процесса для последующего анализа.

6. Обеспечение системой управления УВМК возможности работы как в основных рабочих режимах (автоматический и ручной режимы), так и во вспомогательных (режимы комплексных регламентных проверок, тарировки и т. д.). Во всех режимах необходимо вести контроль корректности действий оператора и документирование текущих параметров технологического процесса. В автоматическом режиме система управления УВМК должна обеспечивать управление технологическим процессом выращивания по технологической программе.

Изначально на УВМК не имелось визуальных средств отображения параметров технологического процесса и датчиков геометрии кристалла и не обеспечивались автоматический режим выращивания и контроль правильности действий оператора.

Выращивание монокристаллов кремния в таких условиях крайне неэффективно, поскольку неточные действия оператора часто приводят к нарушению технологического процесса, в то время как стоимость каждой плавки весьма высока.

В статье излагаются методологический подход, основные принципы и инженерные решения, позволившие сократить обычные при решении задач такого класса временные и финансовые затраты.

Основные параметры объекта управления. УВМК предназначена для получения монокристаллов кремния диаметром до 250 мм и состоит из ростовой камеры, газовакуумной системы, термосистемы, системы охлаждения. Функциональная схема установки показана на рис. 1, где ДУ — датчик уровня расплава, ДТ — датчик температуры расплава, ДД — датчик диаметра кристалла. Ростовая камера имеет высоту около 3 м и диаметр около 1,5 м. Газовакуумная система состоит из пяти вакуумных насосов, линии подачи аргона и большого числа клапанов, положение которых определяет протекание процесса вакуумирования. Внутри камеры расположен нагреватель, который обеспечивает температуру до 1700 °С. Электропитание нагревателя производится от управляемого источника тока (60 В, 3000 А), который совместно с нагревателем образует термосистему. В стенках ростовой камеры проложены магистрали для прохождения охлаждающей жидкости (система охлаждения). УВМК содержит: 10 электроприводов, 20 входных и 12 выходных аналоговых сигналов, 100 входных и 40 выходных дискретных сигналов.

Каждый из параметров технологического процесса должен регулироваться с основной погрешностью не более 1 %.

Требования к системе управления. Для обеспечения работоспособности УВМК аппаратура и программное обеспечение (ПО) системы управления должны удовлетворять следующим требованиям:

1) наличие значительных вычислительных мощностей для управления УВМК в реальном времени;

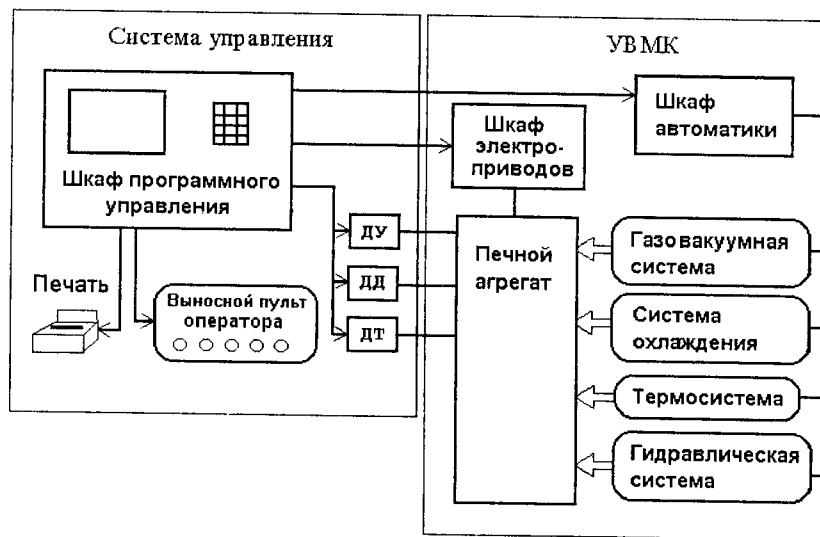


Рис. 1

- 2) контроль возникновения аварийных ситуаций во время работы и предотвращение действий оператора, ведущих к аварийным ситуациям;
- 3) визуальное отображение состояния установки на видеомониторе и диалог с оператором;
- 4) документирование текущих параметров с возможностью получения твердой копии для последующего анализа;
- 5) бесконтактное измерение параметров кристалла и температуры в различных точках зеркала расплава;
- 6) реализация алгоритма управления с большим числом параллельно исполняемых процессов.

Анализ указанных требований показывает, что реализация такой системы в рамках однопроцессорной архитектуры невозможна, поскольку в настоящее время не существует вычислительной платформы, обеспечивающей необходимую производительность и наличие требуемых средств ввода/вывода при приемлемой стоимости.

Аппаратура системы управления. Система управления УВМК реализована на базе распределенной мультипроцессорной архитектуры и состоит из шкафа программного управления, выносного пульта оператора, выносных датчиков геометрии кристалла.

Датчики геометрии кристалла производят измерение уровня и температуры расплава, диаметра кристалла и ширины мениска.

Выносной пульт оператора используется для ввода заданий в основные контуры регулирования в процессе выращивания кристалла в ручном режиме с визуальным контролем оператором процессов в ростовой камере через имеющиеся по ее периметру иллюминаторы.

Шкаф программного управления содержит:

1. Крейт, в котором располагается мультипроцессорная система с системной магистралью Multibus, выполняющая функции управляющей ЭВМ (УВМ). УВМ обеспечивает исполнение алгоритма работы, контроль, регулирование, измерение. Модульная структура УВМ обеспечивает гибкость и возможность увеличения вычислительной мощности.

2. Персональный компьютер (ПК) типа IBM PC/AT, имеющий достаточное качество графического изображения и большую емкость дисковой памяти. ПК обеспечивает ввод команд оператора и отображение информации, поступающей от УВМ. Для этого типа ПК имеется большой спектр программного обеспечения, в том числе и кросс-средств. Учитывая тяжелые условия эксплуатации, для работы операторов разработана технологическая клавиатура. Эта клавиатура, расположенная на передней панели шкафа программного управления и подключенная к стандартному параллельному порту ПК, позволяет, с одной стороны, упростить интерфейс оператора, а с другой — обеспечить выполнение эксплуатационных требований, несмотря на использование ПК неиндустриального исполнения.

В качестве базового элемента УВМ, датчиков и выносного пульта оператора выбран микроконтроллер i80C196NT фирмы "Intel" [2], имеющий высокую производительность и широкие возможности. Подобный выбор позволяет существенно сократить время разработки и наладки аппаратуры системы управления за счет унифицированной основы, а также повысить надежность за счет высокой степени интеграции микроконтроллера.

УВМ содержит: четыре процессорных модуля (МП1—МП4), два модуля входов, два модуля выходов, два модуля контроллеров электроприводов (КЭ), модуль ЦАП/АЦП (рис. 2).

Разработанный процессорный модуль обладает следующими характеристиками: время реакции на большинство внешних событий не более 3 мкс при тактовой частоте 16 МГц; Flash-память (ПЗУ) емкостью 128 Кбайт; оперативная память 7,5 Кбайт; системная магистраль Multibus; оперативная память 2 Кбайт, доступная процессорным модулям только через системную магистраль; последовательный канал типа RS-232; скоростной синхронный канал типа RS-422; четыре канала аналого-цифрового преобразования разрядностью 8/10 бит; десять каналов ввода дискретных сигналов с гальванической

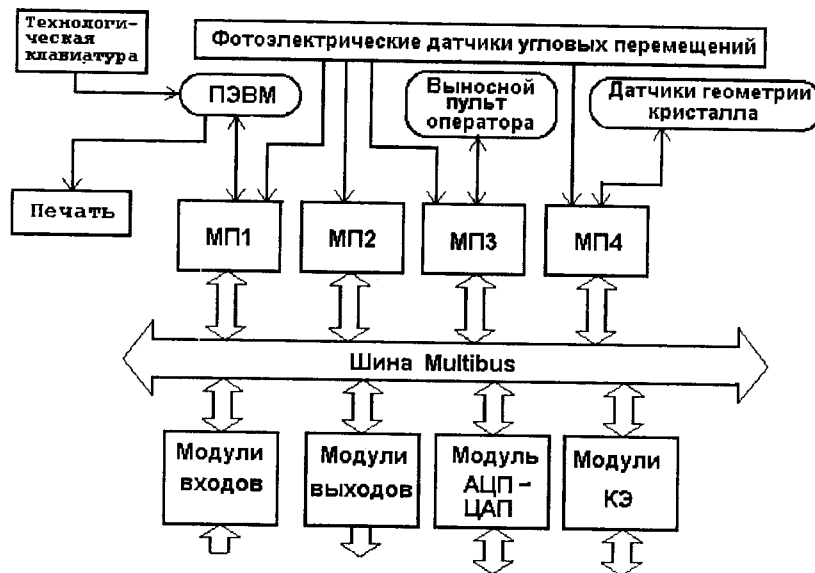


Рис. 2

развязкой; два таймера, причем один из них имеет возможность работы с квадратурными сигналами датчиков угловых перемещений.

Применение Flash-памяти [3] для хранения кода программ обеспечивает возможность оперативной модификации программного обеспечения во время отладки, поскольку программирование микросхем производится без их извлечения из процессорного модуля через последовательный канал RS-232 со штатного ПК (что невозможно при обычной реализации ПЗУ-программ с использованием УФ-стираемых микросхем памяти). Данное решение — одно из критических для проекта, поскольку отлаживать программное обеспечение традиционными методами затруднительно ввиду его объема и сложности.

Оперативная память, доступная процессорным модулям через системную магистраль, образует пространство общего пользования и служит для обмена данными между процессорными модулями, позволяя тем самым организовывать виртуально-однородную среду для исполнения управляющей программы. Другими словами, с точки зрения запрограммированного алгоритма работы установки процессорные модули УВМ, на которых этот алгоритм выполняется, представляют собой одно активное устройство.

Связь с ПК как на этапе отладки, так и при работе управляющей программы производится по последовательному каналу RS-232. Разработанный протокол обмена данными по последовательному каналу предусматривает проверку контрольной суммы и перезапросы в случае сбоев.

Синхронный канал RS-422 позволяет интегрировать в единую систему управления удаленные активные элементы — выносной пульт оператора и датчики геометрии кристалла, а при необходимости и другие устройства. При этом устройства объединяются в локальную сеть типа «Общая шина с маркерным доступом», где одно из устройств выполняет роль арбитра. Протокол обмена данными по сети обеспечивает помехоустойчивость за счет контроля целостности пакетов данных при помощи CRC (циклическая контрольная сумма) и повторной передачи пакетов при сбоях.

Указанные выше разработанные «пассивные» модули для шины Multibus, входящие в УВМ, выполняют следующие функции.

Два модуля входов рассчитаны на ввод до 64 дискретных сигналов с гальванической развязкой.

Два модуля выходов с защитой от короткого замыкания обеспечивают ввод/вывод до 48 дискретных сигналов.

Модуль АЦП/ЦАП, имеющий разрядность 12 бит, позволяет считывать 32 и выдавать четыре аналоговых сигнала. Все аналоговые сигналы гальванически развязаны через нормализаторы фирмы "Analog Devices" [4]. АЦП модуля дополняют возможности встроенных АЦП микроконтроллеров.

Два модуля контроллеров электроприводов содержат ЦАП, дискретные входы и выходы для управления десятью приводами электродвигателей. Алгоритм движения исполнительных органов установки в случаях срабатывания датчиков конечных положений, возникновения аварийного сигнала, срабатывания защиты аппаратного уровня, расположенной на плате модуля (защита типа WatchDog), задается ключами. Такой подход позволяет в случае отказа процессорных модулей или фатальных ошибок ПО предотвратить возникновение аварийных ситуаций и перевести исполнительные органы в безопасные положения.

ПК в системе управления используется для организации графического интерфейса с оператором и документирования. При штатной работе команды, вводимые оператором с технологической клавиатуры, поступают в ПК, затем по последовательному каналу передаются в УВМ, где обрабатываются и выполняются управляющей программой. Вся информация о действиях оператора и изменении состояния объекта управления сохраняется в ПК в виде файлов. Дополнительно ПК обеспечивает сохранение и восстановление при перезапусках системы информации о положении исполнительных органов установки и параметров, введенных оператором, что позволяет в случае нерегламентированного прекращения работы, например сбоя питания, не терять тарифовую информацию, получение которой занимает по времени больше суток. В режиме отладки ПК используется как инструментальная машина для хранения исходных текстов программ, получения исполняемых файлов, загрузки исполняемых файлов в целевые процессоры, ввода команд монитора и отображения отладочной информации. Имеется возможность подключения ПК к локальной вычислительной сети цеха и управления в автоматическом режиме одним оператором несколькими УВМК.

В процессорных модулях датчиков геометрии используется та же базовая схема, что и в процессорных модулях УВМ. Процессорные модули датчиков имеют компактные размеры и расположены непосредственно внутри датчиков.

Работа датчиков организована следующим образом. Аналоговый сигнал с фотодиодных линеек считывается через внутренний АЦП микроконтроллера. Вычисленные числовые значения уровня и температуры расплава, а также диаметра кристалла передаются по синхронному каналу связи в УВМ. Установка процессоров в датчики геометрии кристалла оправдана тем, что, во-первых, за счет применения численных методов обработки сигнала уменьшается погрешность измерения, во-вторых, отсутствует погрешность при передаче данных (передача аналоговых сигналов в случае нераспределенной системы в цеховых условиях привела бы к недопустимому искажению данных), в-третьих, встроенный процессор позволяет быстро модифицировать алгоритм обработки сигналов, в-четвертых, стоимость процессора незначительна по сравнению со стоимостью всего датчика (дополнительно к этому экономия на линиях передачи аналоговых сигналов).

Выносной пульт оператора используется в ручном режиме работы установки и содержит процессорный модуль, выполненный на основе базовой схемы. Информация о положении ручек потенциометров и кнопок, расположенных на передней панели пульта, в цифровом виде передается в УВМ.

Таким образом, вычислительная часть системы управления представляет собой распределенную мультипроцессорную гибкую систему с программно-аппаратной защитой от аварийных ситуаций, которая в совокупности с прог-

рамным обеспечением позволяет удовлетворять жестким требованиям, предъявляемым объектом управления.

ПО системы управления. ПО системы управления состоит из программы интерактивного взаимодействия с оператором (ПИВ) и ПО процессорных модулей. Отделение функций организации графического интерфейса оператора в текстовом режиме; вывод информации на экран видеомонитора в виде цифровых полей, положения и цвета элементов мнемосхемы, текстовых сообщений и графиков; ввод команд оператора и их передачу в ядро системы для последующей обработки.

Внутренняя структура ПИВ представляет собой событийно-управляемую архитектуру с несколькими источниками сообщений и единым механизмом их выбора и обработки.

При выборе средства программирования для ПИВ анализ возможностей доступных графических пакетов общего назначения показал, что ни один из них не обеспечивает предъявляемых задач требований по скорости работы и размеру исполняемого кода. В результате выбор был сделан в пользу стандартных графических возможностей библиотеки BGI (Borland Intl.) [5].

Графический интерфейс пользователя создан на основе векторного описания объектов на экране, поскольку использование растровых графических образов, хотя и позволяет создавать информативные изображения, однако существенно замедляет скорость работы.

Современные способы создания программного обеспечения с использованием объектно-ориентированного языка Си++ [6] позволяют значительно сократить сроки создания ПО. Созданная программная архитектура и библиотека классов дает возможность легко модифицировать внешний вид и функции программы графического интерфейса.

ПО процессорных модулей функционально делится на две части: резидентный монитор-отладчик (монитор); управляющая программа, определяющая алгоритм работы системы в целом.

Монитор расположен в аппаратно-защищенном Boot-блоке Flash-памяти и одинаков для всех процессорных модулей, в том числе для выносных датчиков и пульта оператора. По включении питания монитор обеспечивает инициализацию и тестирование процессорного модуля, затем запуск управляющей программы. Монитор предоставляет возможность на этапе отладки ПО проводить: загрузку программ с ПК в выбранный блок Flash-памяти (кроме Boot-блока), стирание выбранного блока Flash-памяти (кроме Boot-блока), запись/чтение памяти, останов и запуск управляющей программы при проведении отладочных работ. В качестве видеоконтрольного средства общения пользователя с монитором используется штатная ПК. Обмен информацией между монитором и ПК происходит через стандартный последовательный канал RS-232.

Управляющая программа расположена в главном блоке Flash-памяти, который доступен для модификации во время отладки с помощью средств монитора. Управляющая программа выполняет следующие основные функции: инициализацию и тестирование системы; сбор информации о положении исполнительных органов УВМК и ее последующую передачу в ПИВ для отображения; регулирование параметров; исполнение режимов работы установки; исполнение команд оператора, поступающих от ПИВ; контроль возникновения аварийных ситуаций.

В процессе выбора программного обеспечения для управляющей программы ядра системы установлено, что многочисленные специализированные языки, применяемые для решения данного класса задач, не удовлетворяют предъявляемым требованиям. Среди общих недостатков для большинства этих языков можно назвать то, что они не приспособлены для описания объектов авто-

матики большой размерности, в них отсутствует возможность распараллеливания алгоритма работы. Во многих языках отсутствует целочисленная арифметика и возможность создания полноценных идентификаторов [7]. Недавно появившийся на рынке программных продуктов язык ISaGRAF, предлагаемый фирмой "CJ International" [8], устраняет часть указанных недостатков, однако имеет ряд других, которые ограничивают его применение. Из наиболее существенных, на наш взгляд, можно выделить следующие: отсутствие единой методологии создания программ, наличие жесткой иерархической структуры, отсутствие средств обмена статусной информацией, неполный семантический контроль описанного алгоритма, отсутствие средств программирования мультипроцессорных сред.

В качестве основного программного средства создания управляющей программы был использован разработанный ранее при участии авторов язык описания работы дискретных устройств автоматики большой размерности — средство программирования алгоритмов работы микроконтроллеров (СПАРМ), краткое описание которого можно найти в [9].

Язык СПАРМ ориентирован на программирование мультипроцессорных сред, организация процессов допускает гибкие структуры, простой русскоязычный синтаксис предоставляет возможность создания полноценных идентификаторов, имеется интерфейс с другими языками программирования. Реализация языка СПАРМ обуславливает простую адаптацию на процессорах различной архитектуры и обеспечивает гарантированное время реакции на внешнее событие.

При создании управляющей программы использовался тот факт, что алгоритм работы любого сложного устройства можно разделить на некоторое множество более простых, независимых или слабо зависимых между собой процессов, исходя из функциональных, технологических, структурных и т. п. соображений.

В результате такого разбиения алгоритм работы УВМК был представлен в виде множества 273 слабозависимых элементарных процессов.

По функциональному признаку эти процессы можно разбить на четыре категории: 5 % процессов обеспечивают снятие данных, интерфейс с ПИВ; 5 % процессов обеспечивают регулирование параметров технологического процесса; 40 % процессов определяют алгоритм работы; 50 % процессов обеспечивают контроль возникновения аварийных ситуаций, тестирование, автоматическую подстройку системы, обнаружение и исправление ошибок.

Параллельно созданию описания алгоритма работы УВМК проведена адаптация СПАРМ на микроконтроллере i80C196NT. Организация параллельного исполнения процессов позволила расширить синтаксис средствами программирования мультипроцессорных сред.

Эффективная организация параллельного исполнения дала возможность добиться высокой вычислительной мощности и малого времени реакции на внешнее событие (из 273 процессов, исполняющихся на четырех процессорных модулях УВМ, 90 % имеют время реакции 100 мс, 10 % — 10 мс).

Заключение. В статье рассмотрены основные инженерные и методологические решения, примененные при создании автоматизированной системы управления сложным промышленным объектом, и использованы: унифицированная основа на базе мощного микроконтроллера, современные методы создания программного обеспечения и разделение функций организации графического интерфейса оператора и управления объектом. Созданная архитектура обеспечивает возможность расширения системы и простой способ подключения дополнительных внешних устройств.

Испытания у заказчика доказали высокую надежность и эффективность созданной системы управления при умеренной стоимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов. М.: Мир, 1974.
2. Embedded Microcontrollers: Intel Corp., 1994.
3. Flash Memory. Vol. I: Intel Corp., 1994.
4. 7B Series User's Manual: Analog Devices Inc., 1992.
5. Borland C++ Programmer's guide: Borland Intern., 1992.
6. Страуструп Б. Язык программирования Си++. М.: Радио и связь, 1991.
7. Шенброт И. М. Системы программно-логического управления и их применение. М.: ВИНТИ, 1986.
8. ISaGRAF User's Manual: CJ International, 1994.
9. Зюбин В. Е. Средство программирования микроконтроллеров — СПАРМ. Распределенная обработка данных // Пятый международный семинар (Труды). Новосибирск: ИФП СО РАН, 1995.

Поступила в редакцию 28 апреля 1995 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!