

ВЫРАЩИВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ: СТРАТЕГИЯ УСПЕХА – АВТОМАТИЗАЦИЯ

И. Ф. Клисторин, В. Е. Зюбин, А. А. Лубков

В статье отражена суть крупной работы ряда подразделений Института автоматики и электрометрии СО РАН, рассчитанной на длительный период и создание малых серий автоматизированных установок для получения высококачественного монокристаллического кремния диаметром до 250 мм. Обсуждается специфика процесса получения монокристаллического кремния. Рассматривается комплексный подход к проблеме, обеспечивающий постоянное совершенствование производственного процесса, безопасность функционирования системы и высокую экономическую эффективность.

Введение

На современном этапе развития полупроводниковый кремний продолжает оставаться основным материалом для нано- и микроэлектроники, оптоэлектроники, солнечной энергетики и силовой электроники. Без кремния невозможно создать ни современные научные приборы, ни компьютеры, ни мобильные телефоны, ни бытовую технику. Кремниевые пластины преобразуют солнечный свет в электричество, обнадёживая нас возможностью создания экологически чистых и безопасных способов получения энергии. Технологический уровень производства кремния является не только важнейшим компонентом научной и производственной базы страны, но и существенным элементом её национальной безопасности.

До получения конечного продукта – современного прибора или сложного вычислительного комплекса – кремний должен пройти сложный путь: от разведки месторождения высококачественного кварцита, через получение кремниевых пластин для изготовления микросхем и до сборки прибора на производственном конвейере. Кремниевые пластины получают из монокристаллов, которые, в свою очередь, выращивают из расплава кремния (самый распространенный метод). Важнейшие показатели качества кремниевых пластин – а, в конечном счёте, и качества конечной продукции – определяются процессом роста монокристалла. Для этого этапа основная и чрезвычайно сложная проблема, представляющая как теоретический, так и прикладной интерес, – это проблема получения структурного совершенства кристалла при максимально большом диаметре его поперечного сечения.

Процесс получения монокристаллов кремния методом выращивания из расплава чрезвычайно сложен для автоматизации: управление ведётся по нескольким параметрам, конечный продукт должен удовлетворять нескольким критериям, а сам процесс характеризуется сильной изменчивостью законов регулирования. Несмотря на то, что подобные процессы широко известны (в химии, металлургии, кристаллографии, при получении сверхчистых, высокосовершенных и редких материалов, биосинтезе), решение проблемы автоматизации таких производств по-прежнему привлекает внимание специалистов.

Нестабильность процесса, отсутствие математических описаний, пригодных для использования в системе управления, делают экспериментальные работы единственным способом, позволяющим выявить взаимозависимость параметров и создать управляющие алгоритмы. Расходы на эксперимент становятся неотъемлемой и существенной частью затрат при эксплуатации.

Объём экспериментальных работ при получении управляющих алгоритмов – *технологических программ (ТП)* выращивания – существенно возрастает при попытках получить продукцию в граничных условиях, где течение процесса является крайне капризным, нестационарным и связано с ужесточением требований к комплексу технических средств по надёжности и погрешности регулирования [1].

Важным моментом, который необходимо учитывать при создании современных систем управления, является высокая динамика рынка: элементная база электронных компонентов постоянно меняется. Поэтому, чтобы обеспечить сопровождаемость системы управления со сроком службы десять и более лет, а также сократить сроки её создания, необходимо использовать метод системной интеграции.

В статье излагаются комплексный подход и архитектурные решения, которые позволяют минимизировать временные и финансовые затраты при создании и сопровождении системы управления для выращивания монокристаллического кремния. Результаты представленной работы могут быть интересны специалистам, занимающимся автоматизацией сложных технологических процессов на базе типовых аппаратных решений.

Анализ характеристик объекта управления и требований к системе управления

Как объект управления установка для выращивания монокристаллов кремния (УВМК) методом вытягивания из расплава (метод Чохральского [2]) представляет собой комплекс технологических подсистем. УВМК состоит из плавильной камеры и камеры кристалла. УВМК включает газовакуумную систему, термосистему, систему перемещений и систему охлаждения. Размеры УВМК по вертикали – около 5 м, при диаметре плавильной камеры около 1,3 м. Газовакуумная система состоит из четырёх вакуумных насосов, линии подачи аргона и клапанов, положение которых определяет протекание процесса вакуумирования. Внутри плавильной камеры расположен нагреватель, который обеспечивает разогрев до 1700°C. Нагреватель и источник питания (мощностью 180 кВт) образуют термосистему. Существенное влияние на процесс кристаллизации оказывают скорость вытягивания кристалла, положение тигля с расплавом относительно нагревателя и угловые скорости вращения кристалла и тигля. Система перемещений включает одновременное управление четырьмя прецизионными приводами. В стенках обеих камер проложены магистрали для прохождения охлаждающей жидкости (система охлаждения). УВМК содержит несколько десятков разнородных аналоговых и около сотни цифровых входных и выходных сигналов. Каждая установка имеет индивидуальные особенности, описываемые более 300 настроечными значениями.

Параметры технологического процесса должны регулироваться с основной погрешностью не более 1%.

При автоматизации сложных объектов к системе управления предъявляется комплекс жёстких требований, включающий требования по помехозащищённости, надёжности, технологичности, времени восстановления, эргономичности, стоимости и т.д. Кроме этого УВМК как объект управления имеет следующий ряд основных специфических особенностей:

- расплавленный кремний чрезвычайно агрессивен, выход процесса из-под контроля может привести к значительным материальным потерям и даже человеческим жертвам, поэтому к системе управления предъявляются повышенные требования по надёжности и устойчивости;
- в систему необходимо интегрировать большое число разнородных цифровых и аналоговых устройств. Система управления должна предусматривать возмож-



Рис. 1. Схема взаимодействия структурных подразделений

ность построения производственной системы цехового уровня;

- экспериментальная составляющая предполагает регистрацию больших объёмов информации для последующего анализа;
- низкий уровень компьютерной подготовки обслуживающего персонала обуславливает простой, дружелюбный и эффективный пользовательский интерфейс на основе современных мультимедийных средств;
- система управления УВМК, помимо программных средств анализа экспериментальной информации, должна обеспечивать автоматизацию обслуживания производственного процесса: создание ТП, настройку программно-аппаратных средств, паспортизацию продукции, удалённый мониторинг производственного участка.

Для данных требований приемлемая стоимость разработки и сопровождения системы управления УВМК может быть обеспечена только при использовании «мэйнстрим»-платформ в промышленном исполнении. Удовлетворительное решение достижимо только в рамках комплексного подхода, приближённого к концепции АСУ, который в дополнение к программно-алгоритмическому обеспечению предполагает проработку организационных вопросов производства.

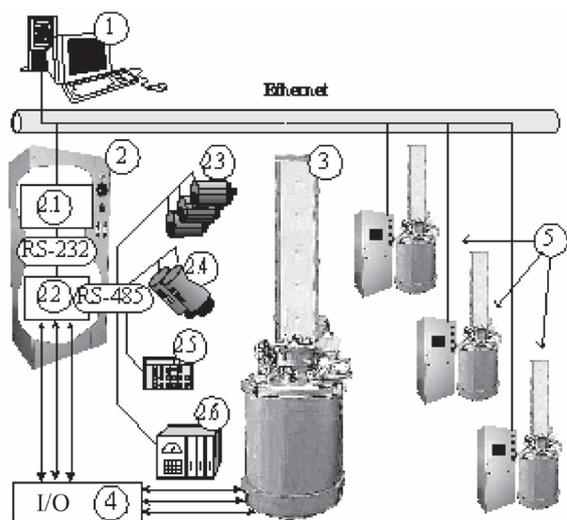


Рис. 2. Система управления ростовым оборудованием. Цеховой уровень

Комплексный подход

Таким образом, автоматизация роста монокристаллов кремния должна гибко интегрировать в единую систему структурные подразделения, задействованные в производственном цикле.

В результате анализа [1] были выделены следующие системообразующие производственные подразделения (рис. 1):

- производственный участок, на котором стоит технологическое оборудование и выращиваются монокристаллы;
- отдел технолога, обеспечивающий ведение технологических карт и соблюдение регламентов;
- отдел анализа и сертификации, осуществляющий контроль параметров выпускаемой продукции;
- конструкторский отдел, занимающийся коррекцией технологической оснастки;
- архивный отдел для сопровождения баз данных, интегрирующих в единое целое информацию о режимах ведения процесса (с производственного участка), используемых технологических программах (отдел технолога) и параметрах выращенных кристаллов (отдел анализа и сертификации);
- отдел моделирования, обеспечивающий постоянное совершенствование технологического процесса на основе документированных параметров проводимых плавки и результата анализа качества полученных кристаллов.

Комплексный подход позволяет организовать быстро сходящийся итерационный процесс отработки режимов выращивания по схеме: «плавка и архивация данных» – «анализ

архивированной информации» – «коррекция технологической программы для новой плавки». Накапливаемая в архивах информация позволяет задействовать методы статистического моделирования (data mining технологии) для постоянного совершенствования технологического процесса во время штатной эксплуатации.

Архитектура системы управления УВМК

В Институте автоматики и электрометрии СО РАН разработана и испытана на практике система управления ростовым оборудованием [3].

Система (рис. 2) построена на серийно изготавливаемой элементной базе и имеет распределённую многомашинную архитектуру, включающую набор программных средств технологического уровня (1) и программно-технические комплексы (ПТК) производственного участка (5), объединённые цеховой сетью Ethernet.

Технологический уровень обеспечивает удалённый мониторинг системы, анализ экспериментальных данных, гибкую настройку алгоритмов ПТК нижнего уровня, учёт и паспортизацию продукции. ПТК производственного участка включает ростовую установку (3) и герметичный шкаф программного управления (2), на передней панели которого расположен сенсорный экран промышленного ПК (2.1), реализующий мультимедийный интерфейс пользователя (видео, голосовые сообщения, мнемосхемы, графики, текст). Высоконадёжный контроллер (2.2) обеспечивает отработку технологических программ, интеграцию цифровых устройств: приводов (2.3), датчиков (2.4), источника питания и т.д. (2.5 – 2.6), и управление подсистемами ростовой установки (4).

Связь между ПТК производственного уровня (5) и ПТК технолога (1) базируется на протоколе TCP/IP. Эта связь обеспечивает построение масштабируемой цеховой системы с несколькими ростовыми установками и единым центром технологической поддержки.

Таким образом, реализованная система управления УВМК функционально перекрывает архивный отдел, отдел технолога, производственный участок и частично отдел сертификации.

Проведённые натурные испытания на территории ФГУП «Красмаш» подтвердили эффективность созданной системы. Уже на пятой экспериментальной плавке был выращен кристалл заданных параметров. Следует особо подчеркнуть, что получение этого результата существенно осложнялось постоянными изменениями в конструкции установки и алгоритме

управления, поскольку во время экспериментальных плавов в первую очередь обрабатывался ПТК.

ПО системы управления

При выборе средства программирования промышленного ПК оператора анализ возможностей имеющихся на рынке т.н. SCADA-пакетов показал, что ни один из них не обеспечивает выполнение предъявляемых задач требований по функциональным возможностям [4]. Затраты на доработку таких систем оказались соизмеримы с созданием уникальной специализированной системы. При учёте стоимости покупных экземпляров это делало использование стандартных пакетов экономически неэффективным. В результате выбор был сделан в пользу стандартных графических возможностей библиотеки Visual C++. Современные способы создания программного обеспечения с использованием объектно-ориентированного языка Си++ позволили значительно сократить сроки создания ПО [5]. Программная архитектура и библиотека классов позволяет с приемлемыми трудозатратами модифицировать внешний вид и функции программы графического интерфейса. В качестве операционной системы использовалась ОС Windows 2000.

ПО контроллера написано на специализированном языке Рефлекс, предназначенном для программирования высоконадёжных управляющих алгоритмов [6]. Язык Рефлекс, разработанный в Институте, успешно применялся в течение десятка лет на объектах различной степени сложности. Язык Рефлекс выполнен как диалект языка Си. Язык имеет русскоязычный синтаксис. Это делает его особенно привлекательным для отечественных пользователей. Практические и теоретические исследования его прагматических свойств показывают, что на настоящий момент ближайшие аналоги языка (языки стандарта МЭК 61131-3) уступают ему по целому ряду ключевых параметров. ПО контроллера, описанное на языке Рефлекс, реализует критические функции системы с таким расчётом, что при выходе из строя ПК оператора система продолжает оставаться работоспособной.

Таким образом, отделение некритичных для процесса функций интерфейса с оператором и собственно управления УВМК позволило строить ПО оператора на базе Wintel платформы, предоставляющей широкие мультимедийные возможности.

На технологическом уровне использовались следующие подходы. Удалённый мониторинг реализовывался через средства COM/DCOM, которые позволили использовать штатную программу уровня оператора. Анализ

архивированной информации и программа создания/редактирования технологических программ реализованы также средствами Си++. Паспортизации кристаллов выполнена на базе комплекта программ Microsoft Office.

Комплекс физического моделирования

Важный элемент комплексной автоматизации – поддержка функций отдела моделирования, которые, в частности, предполагают имитационное моделирование объекта [1]. При имитационном моделировании процесса кристаллизации основное внимание уделяется исследованию процессов тепло- и массопереноса в расплаве, знание которых позволяет оптимизировать режимы роста. В качестве имитаторов используются легкоплавкие вещества, по своим физическим свойствам близкие к характеристикам расплавленного кремния, химически инертные и прозрачные.

При исследовании процесса выращивания монокристаллического кремния имитационное моделирование особенно эффективно. С одной стороны, на порядки снижаются расходы на эксперимент за счёт безопасности условий его проведения, снижения энергетических затрат и исключения дорогостоящих расходных материалов (кварцевых тиглей, аргона, собственно кремния). С другой стороны, химическая инертность и прозрачность имитатора позволяют получать данные, которые невозможны для реального непрозрачного расплава кремния: детально исследовать распределение температур низкоинерционными датчиками-термопарами и визуально фиксировать массоперенос на специально подготовленных взвешках (дисперсионная фаза – маркёры, дисперсионная среда – прозрачный имитатор расплава).

В настоящее время совместно с Институтом теплофизики СО РАН проводятся работы по созданию моделирующего комплекса. Аппаратно система управления построена на: выносных датчиках Miracle («МСТ Торнадо») с протоколом «Modbus over TCP/IP»; модулях ADAM серии 4000 (Advantech), протокол RS-485; и двигателей MDrive17 (IMS), протокол RS-485. Связь с модулями Miracle, расположенными на вращающихся частях модели, осуществляется по стандарту 802.11g (WiFi-модули WAP40xx фирмы Planet). В качестве IDE разработки ПО используется среда LabVIEW (National Instruments).

Спроектированное ПО позволяет экспериментатору: настраивать систему в ручном режиме, задавать схему эксперимента, проводить эксперимент в автоматическом режиме и обрабатывать экспериментальные данные.

Заключение

На основе сформулированных специфических требований к автоматизированной системе управления сложным промышленным объектом были предложены решения, отработанные на практике при создании системы управления установкой по выращиванию монокристаллов кремния большого диаметра. Ключевая особенность предлагаемого комплексного подхода – не только автоматизация производственного участка, но возможность создания масштабируемой цеховой производственной системы, обеспечивающей непрерывное совершенствование технологического процесса и эволюционное расширение функциональности.

В работе были использованы унифицированная основа на базе «мэйнстрим»-компонентов и современные методы создания программного обеспечения. За счёт этого были обеспечены низкая стоимость тиражирования и снижение затрат на сопровождение. Разнесение некритических (с точки зрения безопасности) функций графического интерфейса оператора и особо ответственных функций управления объектом по разным вычислительным платформам позволило, с одной стороны, использовать широко развитые средства мультимедиа на базе Wintel, а с другой – обеспечить надёжность системы.

Испытания показали высокую эффективность созданной системы управления при умеренной стоимости. Спроектировано функциональное расширение системы для автоматизации комплекса физического моделирования.

Работа выполнена при поддержке гранта №84 СО РАН-2006 на междисциплинарный интеграционный проект «Создание физической

модели и исследование процессов выращивания крупногабаритных монокристаллов кремния».

Литература

1. Зюбин В.Е. Создание управляющих алгоритмов для сложных технологических процессов // Автоматизация и современные технологии, 2004, №8. С.27-31
2. Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов. М.: Мир, 1974.
3. Зюбин В. Е., Клисторин И. Ф., Лубков А. А. Архитектура системы управления установкой для выращивания монокристаллов кремния // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». № 33. 2005. С.43-47.
4. Бевзов А.Н., Курочкин А.В., Окунишников С.В. Программное обеспечение оператора установки по выращиванию монокристаллов кремния // Датчики и системы, 2004, № 12, С. 27-29.
5. Бевзов А.Н. Применение паттернов проектирования при создании автоматизированной установки по выращиванию монокристаллов кремния // Датчики и системы, 2004, № 12, С. 22-24.
6. Язык Рефлекс. Информационный портал // Reflex group, 2006 [<http://reflex-language.narod.ru>]

Клисторин Илья Филиппович: д.т.н., профессор, академик МАИ, член-корр. АН Молдавии, главный научный сотрудник, Институт автоматики и электрометрии СО РАН (630009, Новосибирск, проспект Коптюга, 1), тел. (383) 330-71-62

Зюбин Владимир Евгеньевич: к.т.н., старший научный сотрудник, руководитель группы языковых средств проектирования информационных систем управления, Институт автоматики и электрометрии СО РАН (630009, Новосибирск, проспект Коптюга, 1), тел. (383) 330-71-62, e-mail: zyubin@iae.nsk.su

Лубков Анатолий Александрович: к.т.н., зав. лабораторией интегральных информационных систем управления, Институт автоматики и электрометрии СО РАН (630009, Новосибирск, проспект Коптюга, 1), тел. (383) 333-23-87