

локальный максимум убыли растворенного кислорода. Этот факт свидетельствует о том, что источником наблюдаемого изменения напряжений являются формирующиеся в процессе окисления дефекты. Такими дефектами могут служить преципитаты кислорода и ОДУ, зародыши которых образуются в области кольца в процессе выращивания и растут в ходе последующих высокотемпературных термообработок.

Заключение

Установлено, что матовые области, формирующиеся в процессе термического окисления пластин, образованы ямками травления округлой формы диаметром 0,8—1,4 мкм. Процесс формирования матовых областей при термическом окислении на поверхности пластин существенно зависит от содержания кислорода и его убыли из твердого раствора в процессе роста кристалла и при термообработках. В присутствии линейных дефектов и скоплений микродефектов (дислокаций и кольцевого распределения ОДУ) матовые области не наблюдаются. Предполагается, что формирование матовых областей связано с образованием скопле-

ний межузельных атомов на поверхности пластин в процессе окисления при отсутствии стоков для межузельных атомов в объеме. Предполагается также, что картины формирования матовых областей могут служить чувствительным индикатором распределения объемных несовершенств в пластинах кремния.

Наблюдается пространственная корреляция локального изменения напряжений в пластинах с положением кольца ОДУ. Предполагается, что причиной изменения напряжений в этой области являются кислородные преципитаты, сформировавшиеся при выращивании кристалла и растущие при окислении.

Библиографический список

1. Hasebe M., Takeoka Y., Shinoyama S., Naito S. // *Jap. J. Appl. Phys.* 1989. V. 28. N 11. P. L1999.
2. ASTM F1727-97.
3. Sadamitsu S., Okui M., Sueoka K. et al. // *Jap. J. Appl. Phys.* 1995. V. 34. N 5B. P. L597.
4. Voronkov V. V., Falster R. // *J. Cryst. Growth.* 1998. V. 194. P. 76.
5. Инденбом В. Л. // *Кристаллография* 1964. Т. 9. С. 74.
6. Schimmel D. G. J. // *Electrochem. Soc.* 1979. V. 126. N 3. P. 479.
7. Zakharov S. N., Laptev S. A., Kaganer V. M. et al. // *Phys. status solidi.* 1992. V. 131. P. 143.

УДК 621.315.592

КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

© 2005 г. В. Е. Зюбин, А. А. Лубков
Институт автоматики и электрометрии СО РАН

Введение

Процесс получения монокристаллов кремния методом выращивания из расплава чрезвычайно сложен для автоматизации: управление ведется 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, при получении сверхчистых, высокосоввершенных кристаллов, в 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 взаимосвязь параметров и создать управляющие алгоритмы. Расходы на эксперимент становятся неотъемлемой и существенной частью затрат при эксплуатации.

Объем экспериментальных работ при получении управляющих алгоритмов — программ технологических (ПТ) процессов — существенно возрастает при попытках получить продукцию в граничных условиях, где течение процесса является нестационарным и связано с ужесточением

Обобщены результаты работы ряда подразделений Института автоматики и электрометрии СО РАН (г. Новосибирск) по созданию малых серий автоматизированных установок для получения высококачественного монокристаллического кремния диаметром до 250 мм. Рассмотрен комплексный подход к проблеме, включающий вопросы обеспечения надежности критических производств, достижения его экономической эффективности, создания комфортного общения обслуживающего персонала с системой управления, а также проблемы интеграции одиночных ростовых установок в цеховые комплексы, сертификации конечного продукта и постоянного совершенствования качества производственного процесса на основе анализа документированной информации.

требований к комплексу технических средств в отношении надежности и погрешности регулирования [1].

Важным моментом, который необходимо учитывать при создании современных систем управления, является высокая динамика рынка элементной базы электронных устройств. Поэтому для обеспечения сопровождаемости системы управления со сроком службы десять и более лет, а также сокращения сроков ее создания необходимо использовать метод системной интеграции.

Ниже рассмотрен комплексный подход и архитектурные решения, которые позволяют минимизировать временные и финансовые затраты при создании и сопровождении системы управления для выращивания монокристаллического кремния. Результаты работы должны 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 комплекс технологических подсистем. УВМК состоит из плавильной камеры и камеры кристалла и включает газовакуумную систему, термосистему, систему перемещений и систему охлаждения. Высота установки порядка 3 м при диаметре плавильной камеры - 1,3 м. Газовакуумная система состоит из четырех вакуумных насосов, линии подачи аргона и большого числа клапанов, положение которых определяет протекание процесса вакуумирования. Внутри плавильной камеры расположен нагреватель, который обеспечивает разогрев до 1700 °С. 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 порядка сотни цифровых входных и выходных сигналов. Каждая установка имеет отличительные особенности, описываемые более 300 настроечными значениями.

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

При автоматизации сложных объектов к системе управления предъявляется комплекс жестких требований, включающий требования по помехозащи-

щенности, надежности, технологичности, времени восстановления, эргономичности, стоимости и т. д. Кроме того, УВМК как объект управления имеет следующий ряд основных специфических особенностей:

- расплавленный кремний химически активен, выход процесса из-под контроля может привести к значительным материальным потерям и даже человеческим жертвам, поэтому к системе управления предъявляются повышенные требования по надежности и устойчивости;

- в систему необходимо интегрировать большое число разнообразных цифровых и аналоговых устройств; система управления должна предусматривать возможность построения производственной системы цехового уровня;

- экспериментальная составляющая предполагает регистрацию больших объемов информации для последующего анализа;

- низкий уровень компьютерной подготовки обслуживающего персонала обуславливает простой, дружелюбный и эффективный для пользователя интерфейс на основе современных мультимедийных средств;

- система управления УВМК, помимо программных средств анализа экспериментальной информации, должна обеспечивать автоматизацию обслуживания производственного процесса — создание ПТ, настройку программно-аппаратных средств, паспортизацию продукции, удаленный мониторинг производственного участка.

Комплексный подход при автоматизации роста монокристаллов кремния должен обеспечивать гибкую интеграцию в единую систему структурных подразделений, задействованных в производственном цикле [1]. Основные производственные подразделения с кратким указанием их функций приведены ниже.

1. Производственный участок, на котором стоит технологическое оборудование и выращиваются монокристаллы.

2. Отдел технолога, обеспечивающий ведение технологических карт и соблюдение регламентов.

3. Отдел анализа и сертификации, осуществляющий контроль параметров выпускаемой продукции.

4. Конструкторский отдел, занимающийся коррекцией технологической оснастки.

5. 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).

6. Отдел моделирования, обеспечивающий постоянное совершенствование технологического процесса на основе документированных параметров проводимых плавок и результатов анализа качества полученных кристаллов.

Анализ ситуации показывает, что для указанных требований к системе управления УВМК приемлемая стоимость разработки и сопровождения может быть обеспечена только при использовании популярных платформ на базе высокопроизводительных процессоров в промышленном исполнении.

Архитектура системы управления УВМК

Разработанная система управления УВМК имеет распределенную многомашинную архитектуру и конструктивно выполнена в виде программно-технического комплекса (ПТК) производственного участка и ПТК технологического уровня (рисунок).

ПТК производственного участка включает герметичный шкаф программного управления (ШПУ), на передней панели которого расположен сенсорный экран, а на боковой — блок разъемов для подключения выносных устройств и аналоговых и цифровых сигналов с УВМК. На переднюю панель ШПУ также выведены аварийная кнопка, выключатель питания и звуковой динамик. К блоку разъемов по последовательному каналу подключаются приводы, выносной пульт оператора, датчики и источник питания нагревателя. ШПУ оснащен бесперебойным источником питания, обеспечивающим функционирование системы при кратковременных сбоях питания.

Приводы обеспечивают перемещение и вращение затравкодержателя и тигля.

Датчики служат для бесконтактного измерения геометрии выращиваемого кристалла, температуры нагревателя, а также температуры и уровня расплава.

Выносной пульт оператора используется как альтернативное устройство ввода команд и заданий в основные контуры регулирования, в то время как оператор работает в ручном режиме и визуально контролирует процессы в ростовой камере через иллюминаторы, расположенные по ее периметру.

ШПУ содержит:

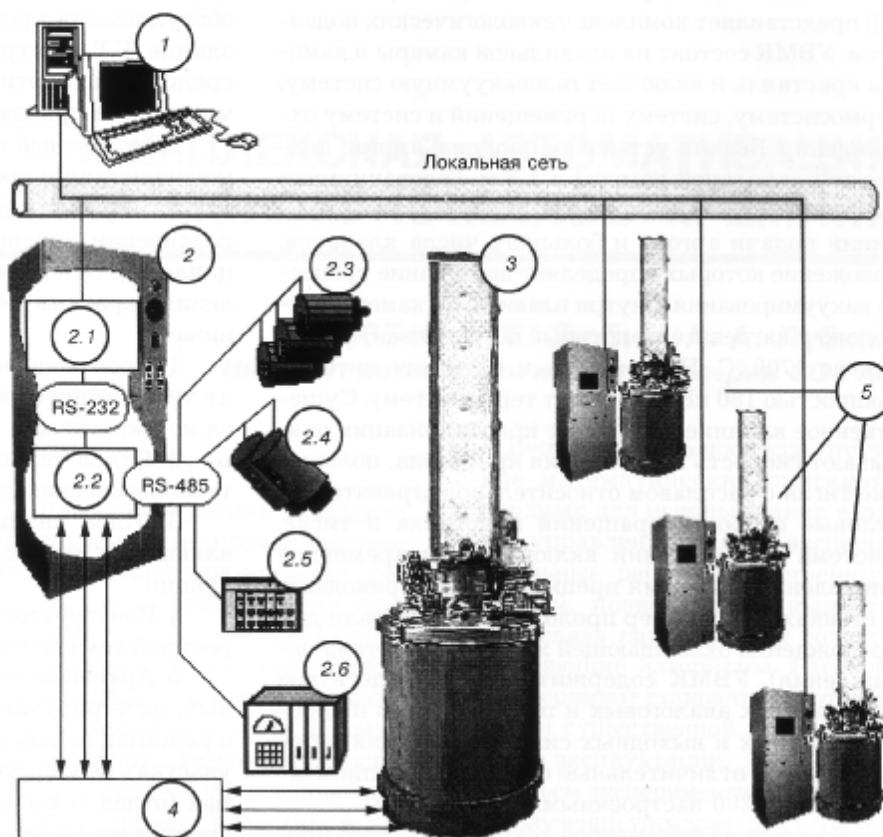
– крейт контроллера программного управления (КПУ), выполненный в стандарте MicroPC и реализующий функции управляющей ЭВМ (КПУ обеспечивает исполнение алгоритма работы, контроль, регулирование и

измерение, а модульная архитектура крейта — модифицируемость аппаратуры и гибкую настройку на условия конкретного применения);

– панельный компьютер оператора (ПКО) типа IBM PC/AT с сенсорным экраном, имеющий достаточное качество графического изображения и большую емкость дисковой памяти (ПКО обеспечивает ввод команд оператора и отображение информации, поступающей от КПУ. Для этого типа компьютеров имеется большой спектр программного обеспечения, в том числе и кросс-средств. Сенсорный экран ПКО обеспечивает простое взаимодействие оператора с системой управления).

Кроме двух последовательных каналов связи с ПКО, КПУ имеет четыре выделенных последовательных канала RS-232/485, через которые подключаются удаленные активные устройства: выносной пульт оператора, датчики геометрии кристалла, источник питания, приводы, а при необходимости и другие. К сожалению, по ряду причин в системе не удалось использовать унифицированный протокол, но наличие нескольких каналов связи позволило преодолеть это препятствие.

ПКО в системе управления используется для организации графического диалога с оператором и



Система управления УВМК:

1 — рабочее место технолога; 2 — шкаф программного управления; 2.1 — ПК оператора; 2.2 — контроллер программного управления; 2.3 — цифровые приводы; 2.4 — датчики; 2.5 — выносной пульт оператора; 2.6 — источник питания нагревателя; 3 — УВМК; 4 — аналоговые и цифровые сигналы УВМК; 5 — цеховые рабочие места

документирования. Критические события в системе дублируются звуковыми сообщениями. Есть возможность просмотра на экране полноценного изображения роста кремния, которое поступает от соответствующей видеокамеры датчика геометрии кристалла. При штатной работе команды, вводимые оператором через сенсорный экран, поступают в ПКО, затем по последовательному каналу передаются в КПУ, где обрабатываются и выполняются управляющей программой. Вся информация о действиях оператора, событиях в системе и изменении состояния объекта управления сохраняется в ПКО в виде файлов. Дополнительно, при перезапусках системы, ПКО обеспечивает сохранение и восстановление информации о положении исполнительных органов установки и настроечных параметрах системы, что позволяет в случае нерегламентированного прекращения работы (например, сбоя питания) не терять тарифовочную информацию, получение которой занимает по времени несколько часов. В режиме отладки ПКО используется как инструментальная машина для хранения исходных текстов программ, получения исполняемых файлов, загрузки исполняемых файлов в КПУ и отображения отладочной информации.

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

Программное обеспечение системы управления

Программное обеспечение (ПО) технолога включает специальные программные средства:

- удаленный мониторинг выбранной УВМК;
- настройку ПТК производственного участка;
- анализ архивированной информации;
- создание технологических программ;
- паспортизацию выращенных кристаллов [3].

ПО ПШУ включает построенное на специальных высоконадежных технологиях [4] ПО КПУ, которое отвечает за выполнение критических функций системы, и ПО ПКО, обеспечивающее интерактивное взаимодействие с оператором [5]. Отделение некритичных для процесса функций интерфейса с оператором и собственно управления УВМК позволило строить ПКО на базе Wintel-платформы [6].

При выборе средства программирования для ПО ПКО анализ возможностей имеющихся на рынке так называемых SCADA-пакетов показал, что ни один из них не обеспечивает выполнение предъявляемых задач требований по функциональным возможностям. Затраты на доработку таких систем оказались соизмеримы с созданием уникальной спе-

циализированной системы, что при учете стоимости покупных экземпляров делало использование стандартных пакетов экономически неэффективным. В результате выбор сделан в пользу стандартных графических возможностей библиотеки Visual C++ [7]. Современные способы создания программного обеспечения с использованием объектно-ориентированного языка C++ [8] позволили значительно сократить сроки создания ПО. Созданная программная архитектура и библиотека классов позволяют легко модифицировать внешний вид и функции программы графического интерфейса.

Заключение

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

В работе использованы унифицированная основа на базе популярной архитектуры и современные методы создания программного обеспечения. За счет этого 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 надежность системы.

Испытания у заказчика доказали высокую эффективность созданной системы управления при умеренной стоимости. Уже на пятой плавке, параллельно с отработкой технологической оснастки, получен монокристалл с удовлетворительными характеристиками.

Библиографический список

1. Зюбин В. Е. // Автоматизация и современные технологии. 2004. № 8. С. 27—31.
2. Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов. — М.: Мир, 1974.
3. Безштейнов И. И., Будников К. И., Окунишников С. В. // Датчики и системы. 2004. № 12. С. 25—27.
4. Зюбин В. Е. // Автометрия. 1996. № 2. С. 36—42.
5. Бевзов А. Н., Курочкин А. В., Окунишников С. В. // Датчики и системы. 2004. № 12. С. 27—29.
6. Зюбин В. Е., Котов В. Н., Котов Н. В. и др. // Там же. С. 17—22.
7. Visual C++ 5.0. Руководство разработчика. // Д. Бенет, С. Макконн, В. В. Мейфилд и др.; Пер. с англ. — СПб.: Диалектика, 1998.
8. Бевзов А. Н. // Датчики и системы. 2004. № 12. С. 22—24.