

УДК 66.012-52

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ SIEMENS-РЕАКТОРОМ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

К.А. Козин, А.Г. Горюнов, С.Н. Ливенцов, П.М. Гаврилов*, Ю.А. Ревенко*

Томский политехнический университет

*ФГУП «Горно-химический комбинат», г. Железногорск

E-mail: kozin@phtd.tpu.ru

Предложена каскадная двухконтурная система автоматизированного управления Siemens-реактором производства поликристаллического кремния методом водородного восстановления трихлорсилана, выбран тип регулятора и рассчитаны его параметры. Предложен, программно реализован и исследован алгоритм управления, обеспечивающий оптимальную траекторию ведения технологического процесса. Доказана возможность применения разработанного алгоритма управления для автоматизации аппаратов типа Siemens-реактор.

Ключевые слова:

Поликристаллический кремний, Siemens-реактор, CVD, алгоритм управления, система автоматизированного управления.

Key words:

Polycrystalline silicon, Siemens-reactor, CVD, control algorithm, automated control system.

Полупроводниковый поликристаллический кремний является основным сырьевым материалом солнечной энергетики и силовой электроники. Оптимизация технологии новых производств является весьма актуальной задачей.

В промышленном производстве наибольшее распространение получил метод парофазного химического осаждения (*chemical vapore deposition*, CVD) кремния в процессе водородного восстановления трихлорсилана (ТХС) – SiHCl_3 . Процесс проводят в так называемом Siemens-реакторе проточного типа, в котором образующийся кремний осаждается на разогреваемых электрическим током кремниевых стержнях-основах. Обычно процесс восстановления хлорсиланов ведут при рабочих температурах стержней-подложек 1000...1200 °C [1].

В результате теплообмена кремниевого стержня с окружающей средой, парогазовой смесью (ПГС), его центральная область является более горячей по сравнению с поверхностью. В процессе осаждения кремния, увеличение площади поверхности кремниевого стержня ведет к интенсификации процессов теплообмена и тем самым к росту тепловых потерь. Возникающий радиальный градиент температуры [2] не только ограничивает максимальный радиус получаемых стержней (порядка 150 мм), но и провоцирует существенные внутренние механические напряжения в объеме стержня, что может приводить к его разрушению при остывании на завершающей стадии процесса [3].

Научная новизна работы связана с разработкой новой автоматизированной системы управления Siemens-реактором. Наиболее перспективным методом изучения и оптимизации технологических процессов и их алгоритмов управления является математическое моделирование с использованием компьютерных технологий. Предлагаемые модели процесса (аппарата) являются, как правило, статическими [2, 4, 5] или основаны на эмпирических зависимостях, не раскрывающих физико-химиче-

ские процессы [6–8], что затрудняет разработку оптимальных систем автоматизированного управления и их компьютерных моделей. Данное обстоятельство потребовало разработать модель Siemens-реактора, как объекта управления, реализуя динамические связи между основными технологическими переменными и контролем радиального профиля температуры в стержнях-основах.

В основу модели [9] положено представление стержня в виде цилиндрических зон малой толщины. Моделирование динамики обеспечивается последовательным введением новых зон по мере увеличения радиуса стержня. Сравнением результатов компьютерного моделирования и экспериментов с проверкой адекватности по критерию Фишера установлено, что разработанная математическая модель описывает процесс в промышленном Siemens-реакторе с погрешностью менее 10%, при изменениях входных переменных и параметров процесса в пределах регламентных норм, и может быть использована для синтеза и компьютерного моделирования систем автоматизированного управления.

Вычислительные эксперименты по исследованию переходных функций на разработанной компьютерной модели позволили получить линейную динамическую модель путем аппроксимации ее переходных функций решениями соответствующих линейных дифференциальных уравнений. Структурная схема линейной модели объекта управления представлена на рис. 1.

Основная управляемая переменная технологического процесса является температура поверхности кремниевых стержней, определяющая скорость химической реакции водородного восстановления трихлорсилана. Основной управляющей переменной является величина силы электрического тока через кремниевые стержни. Основными возмущающими воздействиями на температуру стержней являются расход, температура ПГС и концентрация ТХС.

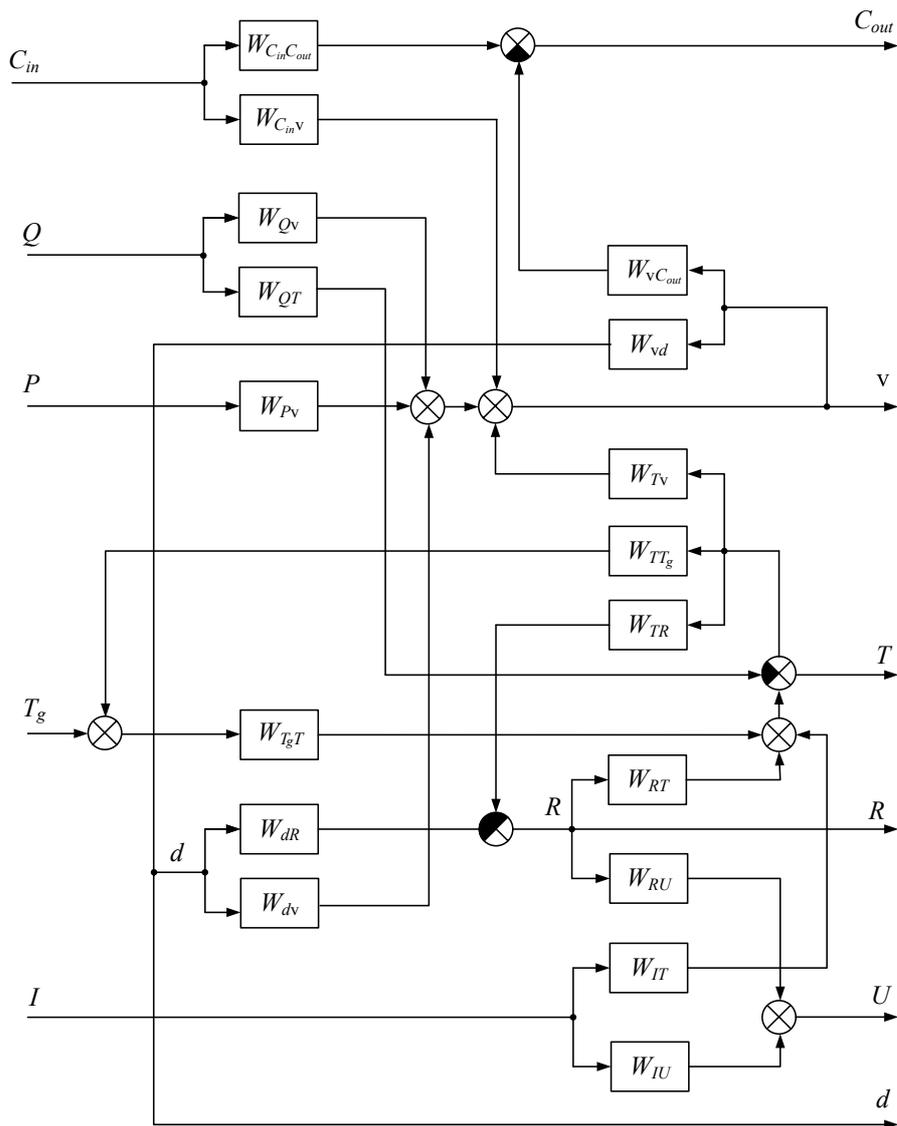


Рис. 1. Структурная схема линейной модели Siemens-реактора: C_{in} , C_{out} – концентрация ТХС на входе и выходе реактора соответственно; Q – расход ПГС; P – давление ПГС в реакторе, T_g – температура ПГС; I – ток через стержни; v – скорость осаждения кремния; T , R , U , d – температура, электрическое сопротивление, падение напряжения и диаметр стержня соответственно; W_{ij} – передаточная функция между входной величиной i и выходной j

Анализ технологического процесса, результатов вычислительных экспериментов на компьютерной модели Siemens-реактора и ее линейной модели позволил выявить наличие обратных положительной и отрицательной связей по каналу «температура», важных при построении контура управления температурой стержней. Такой характер объекта управления не позволяет определить однозначную взаимосвязь между сопротивлением и температурой стержней, что ограничивает использование типовых алгоритмов и автоматизированных систем стабилизации. Таким образом, при построении систем автоматизированного управления (САУ) технологическим процессом производства поликристаллического кремния требуется непрерывный контроль одной из переменных (диаметра или температуры стержней), либо использование алгоритмов с программным заданием роста диаметра стержней.

В данной работе предлагается каскадная двухконтурная система управления Siemens-реактором с программным заданием изменения величины тока через стержни и диаметра стержней для обеспечения оптимальных ростовых условий с максимальным выходом целевого продукта – поликристаллического кремния. На рис. 2 приведена структурная схема модели системы управления Siemens-реактором.

Введение внутреннего быстрого контура по каналу «сопротивление» обусловлено существенной тепловой инерционностью объекта управления и направлено на компенсацию возмущений по температуре. При этом используется интегральная переменная – сопротивление стержня, а не точечное измерение внешним прибором, что является несомненным плюсом по сравнению с одноконтурной САУ по прямым измерениям температуры, так

Для оценки качества регулирования использовались следующие критерии: время и точность регулирования по температуре стержней, массовый выход поликристаллического кремния.

В первом эксперименте в модели системы управления было использовано ступенчатое понижение тока на 100 А, рис. 3.

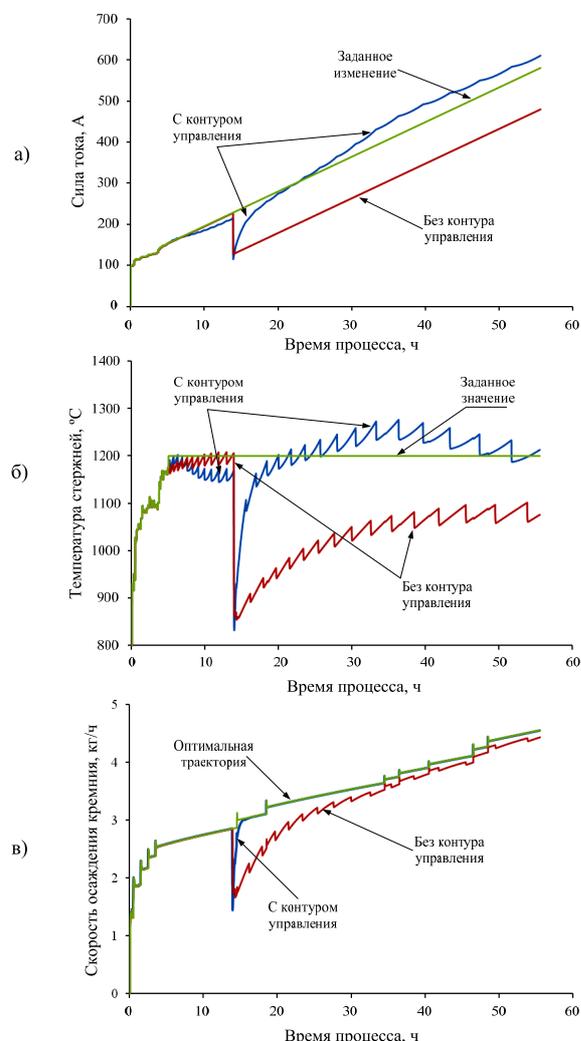


Рис. 3. Временная диаграмма тока (а), температуры стержней (б) и скорости осаждения кремния (в)

Из рис. 3 видно, что разработанная система управления обрабатывает возмущение и возвращает температуру кремниевых стержней на заданный уровень 1200 °С в пределах допустимых границах отклонения, тем самым обеспечивая сохранение заданной скорости осаждения кремния. Пилообразное изменение расчетных значений обусловлено зонной реализацией модели [9], что не мешает исследованиям модели САУ. Анализ переходного процесса по возмущению в канале «Ток» показал, что система обеспечивает заданную точность регулирования: при точности ± 50 °С время регулирования составило порядка 4 ч, при точности ± 100 °С менее 2 ч. Применение САУ позволило снизить потери выхода поликристаллического кремния с 5,3 до 0,4 %.

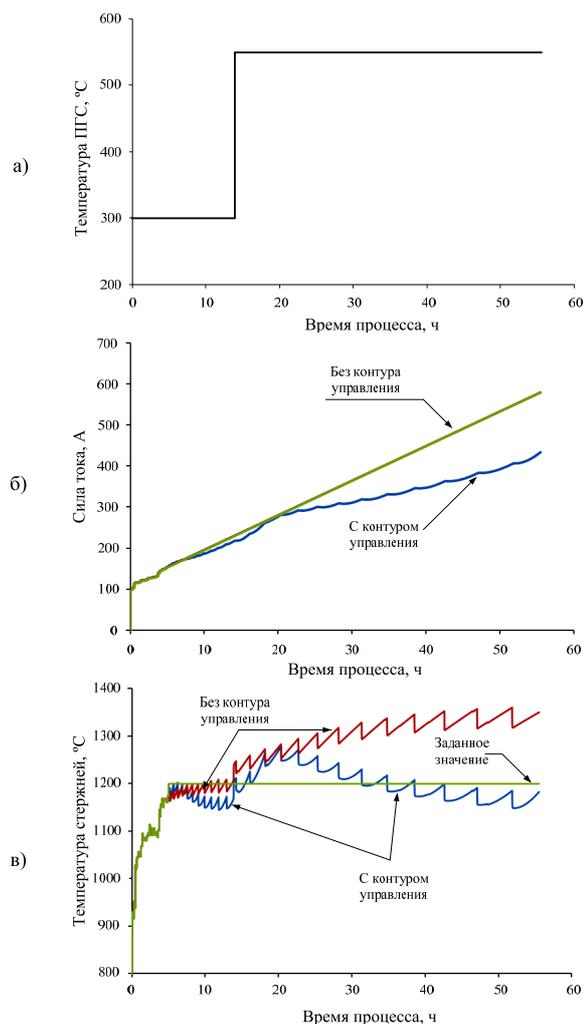


Рис. 4. Временная диаграмма температуры ПГС (а), тока (б) и температуры стержней (в)

При уменьшении расхода ПГС вследствие процессов теплопереноса повышается её температура, что может приводить не только к перегреву стержней, но и к недопустимому процессу образования аморфного кремния в объеме реактора. Для исследования поведения системы управления в данном случае было подано ступенчатое возмущение по температуре ПГС, рис. 4, а. По результатам эксперимента переходный процесс не был обнаружен. Приведенные на рис. 4 данные показывают, что система управления с контуром управления уменьшила величину силы тока через кремниевые стержни для поддержания заданной температуры. Тем самым были сохранены технологические условия, а соответственно и качество поликристаллического кремния.

Таким образом, показана работоспособность алгоритма управления. Дополнительные вычислительные эксперименты позволили установить, что предлагаемая каскадная двухконтурная система управления не теряет устойчивости при такте ввода температуры внешнего контура управления $1 \text{ ч} \pm 30 \text{ мин}$, что позволяет использовать человеко-машинный интерфейс во внешнем контуре управления без потери качества.

Заключение

Предложена каскадная двухконтурная система автоматизированного управления Siemens-реактором производства поликристаллического кремния методом водородного восстановления трихлорсилана, выбран тип регулятора и рассчитаны его параметры. Предложен, программно реализован и ис-

следован алгоритм управления, обеспечивающий оптимальную траекторию ведения технологического процесса. Разработанный алгоритм проходит промышленные испытания в режиме «советчика» на реакторах производства поликристаллического кремния Завода полупроводникового кремния Горно-химического комбината г. Железногорска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фалькевич Э.С., Пульнер Э.О., Червоный И.Ф. и др. Технология полупроводникового кремния. – М.: Металлургия, 1992. – 408 с.
2. Del Coso G., Tobias I., Canizo C., Luque A. Temperature homogeneity of polysilicon rods in a Siemens reactor // Journal of Crystal Growth. – 2007. – V. 299. – P. 165–170.
3. Пат. 5976481 США. МКИ⁶ C01B 33/035. Polycrystal silicon rod and production process therefore / К. Junichi, О. Hiroyuki; Заяв. 20.01.98; Опубл. 02.11.99. – 10 с., 3 л. ил.
4. Елютин А.В., Иванов Л.С., Иванов Р.В. и др. Тепловая модель реактора для получения поликремния водородным восстановлением SiHCl_3 // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2006. – № 3. – С. 25–28.
5. Бровин Д.С., Ловцюс А.А., Колгатин С.Н. Одномерный подход к моделированию Siemens-процесса // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2007. – № 4. – С. 6–10.
6. Погорелов В.Н., Синельников В.П., Стопкевич В.В. и др. Математическое моделирование процесса получения поликристаллического кремния методом водородного восстановления хлорсиланов // Цветные металлы. – 1997. – № 3. – С. 75–77.
7. Погорелов В.Н., Синельников В.П., Стопкевич В.В. и др. Оптимизация процесса получения поликристаллического кремния методом водородного восстановления трихлорсилана в замкнутом технологическом контуре // Известия вузов. Цветная металлургия. – 1999. – № 3. – С. 72–77.
8. Стопкевич В.В., Погорелов В.Н. Исследование оптимальных режимов процесса водородного восстановления кремния // Цветные металлы. – 2007. – № 12. – С. 99–102.
9. Горюнов А.Г., Козин К.А., Ливенцов С.Н. и др. Математическая модель Siemens-реактора как объекта управления // Цветные металлы. – 2009. – № 7. – С. 69–77.
10. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 327 с.

Поступила 18.09.2009 г.

УДК 61.01.29

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ ОЦЕНКИ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДЕГИДРИРОВАНИЯ ПАРАФИНОВ C_9 – C_{14} И ЕГО ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Е.В. Францина, И.М. Долганов, Ю.И. Афанасьева, Э.Д. Иванчина, А.В. Кравцов

Томский политехнический университет
E-mail: evf86@sibmail.com

Разработан и программно реализован в среде Delphi 7.0 алгоритм для идентификации кинетических параметров процесса дегидрирования углеводородов C_9 – C_{14} . Произведена оценка предэкспоненциальных множителей и энергий активаций всех реакций, протекающих в процессе дегидрирования. Предложенный алгоритм может быть использован для решения обратной кинетической задачи при моделировании процессов нефтепереработки и нефтехимии.

Ключевые слова:

Кинетический параметр, математическая модель, дегидрирование, алгоритм расчета, предэкспоненциальный множитель, энергия активации.

Key words:

Kinetic parameter, mathematical model, dehydrogenation, computational algorithm, pre-exponential factor, activation energy.

В настоящее время во многих отраслях науки и техники используют информационные технологии, базирующиеся на методе математического моделирования. Применение программно-реализованных моделей, адекватно описывающих реальные производственные процессы, позволяет существенно повысить их качество, а именно, прогнозировать технологические показатели, проводить мониторинг,

увеличить производительность за счет подбора оптимальных режимов эксплуатации и т. п. [1].

С позиций системного анализа математическая модель любого химического процесса может быть представлена системой нелинейных алгебраических или дифференциальных уравнений в полных и частных производных, которая отражает превращения сырьевых компонентов в продукт, описывает тепло- и