

Л.Я. Шварцман, Э.А. Троценко, Е.В. Баженов

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ SIEMENS-РЕАКТОРА НА ОСНОВАНИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ

Анотація. Виконано моделювання температури поверхні перемички U-образного блоку полікристалічногоскремнія в «Siemens-Реакторі» - для різних схем подачі ПГС. Аналіз даних показав наявність об'єктивних причин тріщинообразування в блоках перемички.

Ключові слова: ідентифікація, процес, моделювання полікристалічний кремній, Siemens-Реактор, тріщини блоку.

Среди ряда известных промышленных технологий получения поликристаллического кремния (ПКК) полупроводниковой чистоты, наиболее распространена и востребована испытанная временем, коммерчески доступная технология Siemens-процесса (водородное восстановление трихлорсилана SiHCl_3) [1,2].

Полусение ПКК по «Siemens-процессу» обеспечило приемлемые на сегодняшний день технико-экономические показатели, темпы роста мировых объемов производства и определило высокий спрос на соответствующее оборудование. Конкуренция на рынке оборудования, направленная, прежде всего, на повышение производительности (рост объема реакционной камеры), привела к необходимости его совершенствования, имея главной целью улучшение качественных показателей ПКК. Для реализации такого подхода необходимо изучение особенностей протекания физико-химических процессов в реакторе водородного восстановления.

Отсутствие способов прямого и точного измерения основного управляемого параметра процесса в Siemens-реакторе, - скорости осаждения кремния на поверхность стержня-подложки U-образной формы, - предопределило развитие инструментов моделирования процесса в реакторе. В традиционных схемах управления Siemens-реактором в качестве параметра управления используется температура поверхности стержней-подложек. На практике [1,3] задача решается путем

использования эмпирически устанавливаемой зависимости температуры стержня от силы питающего электрического тока, что обусловлено доминирующим воздействием этих параметров на процесс.

Необходимость повышения адекватности моделей, используемых для управления процессом, привела к вовлечению в расчеты и других параметров - объемный расход парогазовой смеси (ПГС) «водород:трихлорсилан (ТХС)», концентрационное соотношение «водород:ТХС», температура ПГС в реакторе, и др. Распределенный и стохастический характер параметров, отражающих физико-химические процессы в реакторе, является источником дрейфа во времени оценок, характеризующих адекватность моделей управления. Использование в управлении процессом вычисляемого результирующего комплексного показателя - скорости осаждения кремния – позволит обеспечить в ходе процесса контроль уровня адекватности используемой модели, и соответственно повысит качество управления. Нарушения адекватности являются проявлением неучтенных параметрических связей - случайного «резонирующего» сочетания значений параметров, ошибок моделирования или несоответствия модели управления конкретному конструктивному исполнению реактора.

Тенденция роста объема реакционной камеры определила потребность подачи в реактор значительного большего количества ПГС. Увеличение площади поддона реактора привело к образованию свободного пространства в его центральной части, что и было использовано для размещения дополнительного центрального патрубка подачи ПГС в реактор. Режим истечения через существовавшие периферийные патрубки был сохранен, а баланс по ПГС обеспечивался за счет его притока через центральный патрубок. Однако расчетная производительность процесса (по извлечению ПКК) достигнута не была. Выход на расчетные объёмы подаваемой ПГС для обеспечения заданной скорости осаждения ПКК, приводил к образованию трещин в перемычках U-образных блоков ПКК (рис. 1.) и к аварийному завершению процесса.

Анализ наблюдаемого явления показал, что его причина заключается в изменении газодинамического режима перемещения ПГС (соответственно и транспортировки реагентов) внутри реактора. Подача ПГС из центрального патрубка (сопло диаметром 35 мм) формирует локальное конусообразное впрыскивание ПГС в реактор.



Рисунок 1 - Развитие трещин на перемычке при форсированной подаче ПГС в реактор через центральный патрубок

Имея значительную дальнобойность, струя из центрального патрубка резко изменяет систему потоков ПГС и распределение концентрации ТХС внутри реактора. В области перемычки, со стороны блока, обращённой к низу, образуется зона повышенных концентраций ТХС. Далее центральная струя ПГС тормозится и разрушается в верхней части реактора. В точке соприкосновения с блоком (рис. 2, точка t_1) происходит интенсивная передача тепла от разогретого блока к поверхности перемычки и подаваемой ПГС, в результате чего интенсифицируются химические реакции и ускоряется процесс осаждения ПКК в локальном месте – в нижней части перемычки. Перемещение ПГС вдоль поверхности блока приводит к обеднению смеси реакционными компонентами. В результате к верхней поверхности блока поступает обеднённая ПГС, и реакции протекают с меньшей интенсивностью (рис. 2, точка t_2).

Асимметрия скорости осаждения кремния приводит к появлению тренда центральной, высокотемпературной зоны блока ПКК, в сторону нижней, интенсивно растущей его части [4] (см. рис.2.) и перераспределению теплового поля внутри блока ПКК - образуется менее нагретая зона в верхней части блока.

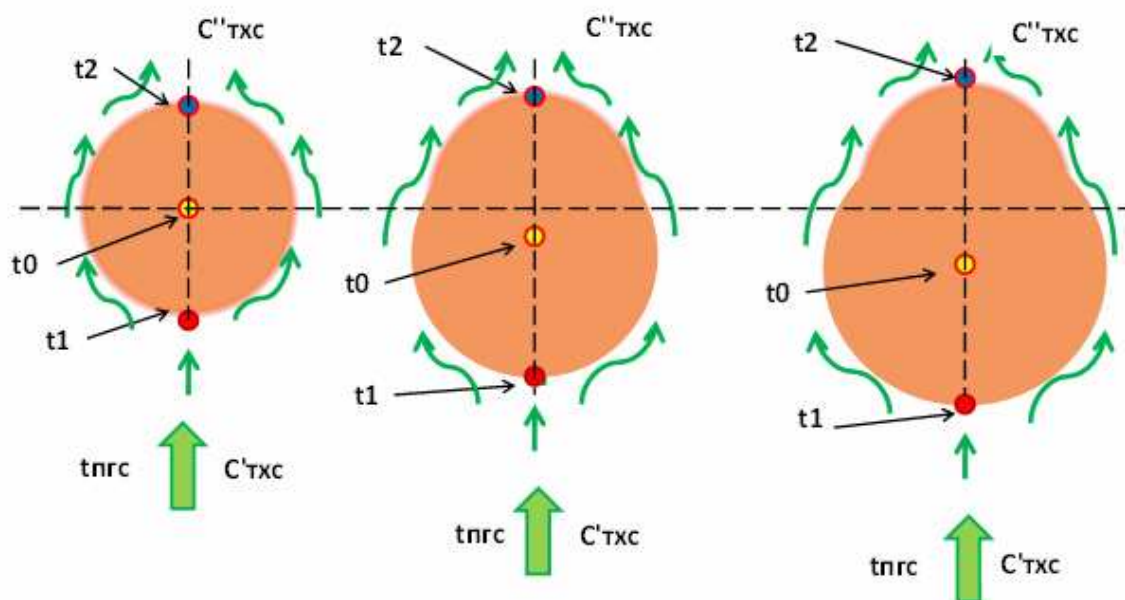


Рисунок 2 - Формирование асимметричной перемычки U-образного блока ПКК (поперечный разрез)

Таким образом, процесс водородного восстановления ТХС можно рассматривать с точки зрения протекания двух конкурирующих внутренних процессов. Первый - увеличение теплоаккумулирующих свойств формируемого блока в нижней (интенсивно растущей и соответственно более габаритной) его части. Второй - увеличение электрического сопротивления блока в верхней (менее нагретой) его части. Следствием этих процессов является смещение центральной высокотемпературной зоны блока от его верхней поверхности и перераспределение теплогенерирующей мощности (выделяемой электрическим током) в сторону менее нагретой (верхней) части блока. Но это перераспределение мощности не обеспечивает рост скорости осаждения кремния, так как поступающая к этой части поверхности блока ПГС уже обеднена реагентами. Таким образом, центральная, высокотемпературная зона блока все далее удаляется от верхней точки. В верхней точке блока температура опускается все ниже, что и ведёт к нарушениям регламента ведения процесса - преобладающему росту

перемычки U-образного блока ПКК со стороны, обращенной к низу (см. рис.1.).

Происходящие в реакторе процессы характерны для систем с положительной обратной связью: местное сочетание более высокой температуры ($t_1 > t_2$) и более высокой концентрации ТХС ($C'_{\text{тхс}} > C''_{\text{тхс}}$), приводящие к более высокой скорости осаждения кремния на нижней поверхности блока, и, как следствие, к смещению центральной, более высокотемпературной зоны блока вниз. Формирование асимметричного блока и удаление центральной, более высокотемпературной зоны блока от поверхности, обращенной кверху ($t_0 > t_1 > t_2$), приводит к дальнейшему уменьшению температуры верхней части блока и ещё большему увеличению асимметрии блока ПКК. В результате - устойчивый рост градиента температуры различных участков блока ПКК, формируемого на перемычке.

Моделирование температурного поля на верхней и нижней поверхностях перемычки блока ПКК позволило получить характер его распределения, приведенный на рис. 3. Точка (t_1) - фронт встречи струи ПГС, точка (t_2) - расположена с противоположной стороны блока, диаметрально противоположна направлению движения струи. Как видно из рис. 3, происходит перераспределение тепла и рост градиента температур между поверхностью и объёмом блока ПКК, формируемого на перемычке. Как следствие - большие температурные напряжения в блоке, рост вероятности образования трещин в перемычке блока ПКК и риск аварийного завершения процесса из-за образования трещин в перемычке между стержнями блока ПКК.

Идентификация причин образования брака позволила откорректировать систему подачи ПГС в реактор за счёт перераспределения объёмов ПГС между боковыми патрубками. Уменьшение термических напряжений в перемычке U-образного блока ПКК и выполненная корректировка схемы подачи ПГС позволили значительно уменьшить температурный градиент и минимизировать риски образования трещин (рис. 4).

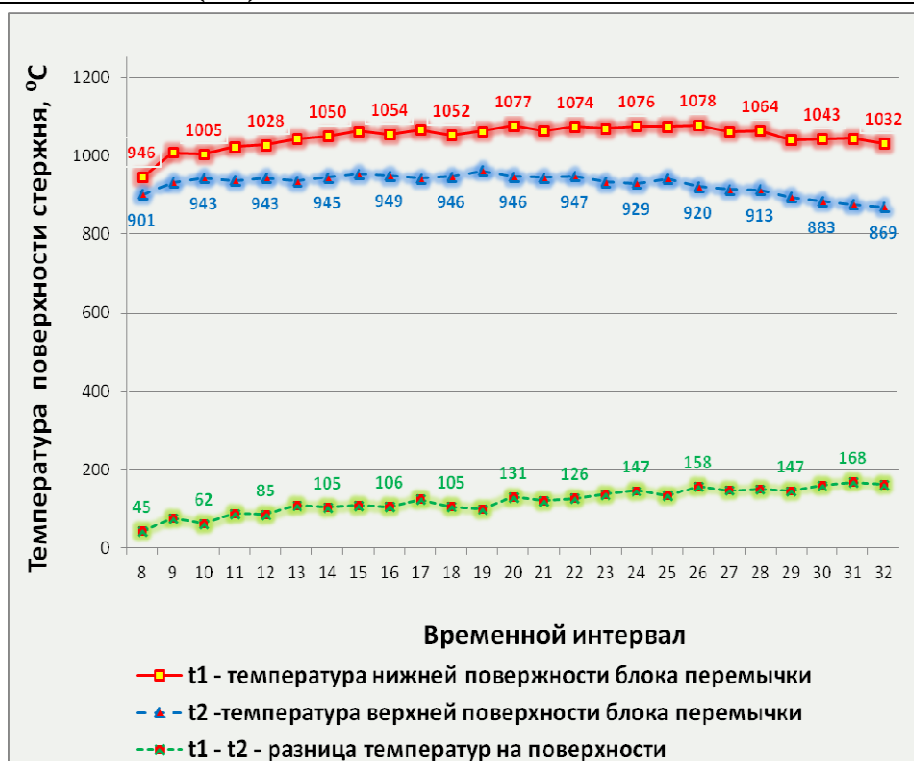


Рисунок 3 - Характер изменения во времени температурного поля на перемычке между стержнями блока ПКК при форсированной подаче ПГС в реактор через центральный патрубок

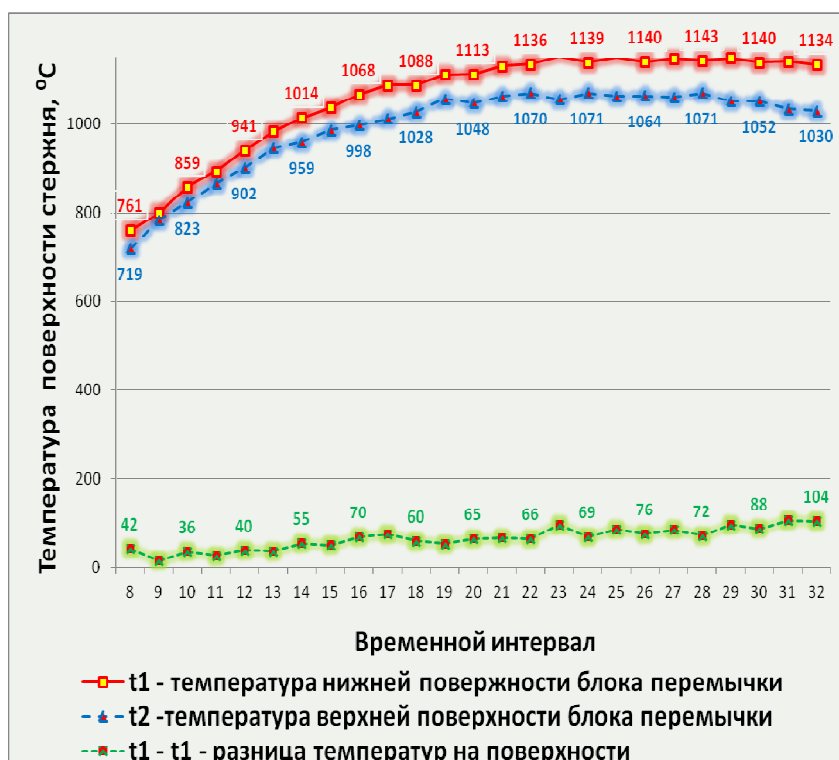


Рисунок 4 - Характер температурного поля после устранения центрального патрубка и перераспределения подачи ПГС в реакторе

Полученные результаты по установлению причины разрушения стержней ПКК, вызванного трещинообразованием на перемычках U-образных блоков, были подтверждены в ходе последующих промышленных процессов, что позволило вывести их на проектную производительность в соответствии с предписанным регламентом (рис. 5).

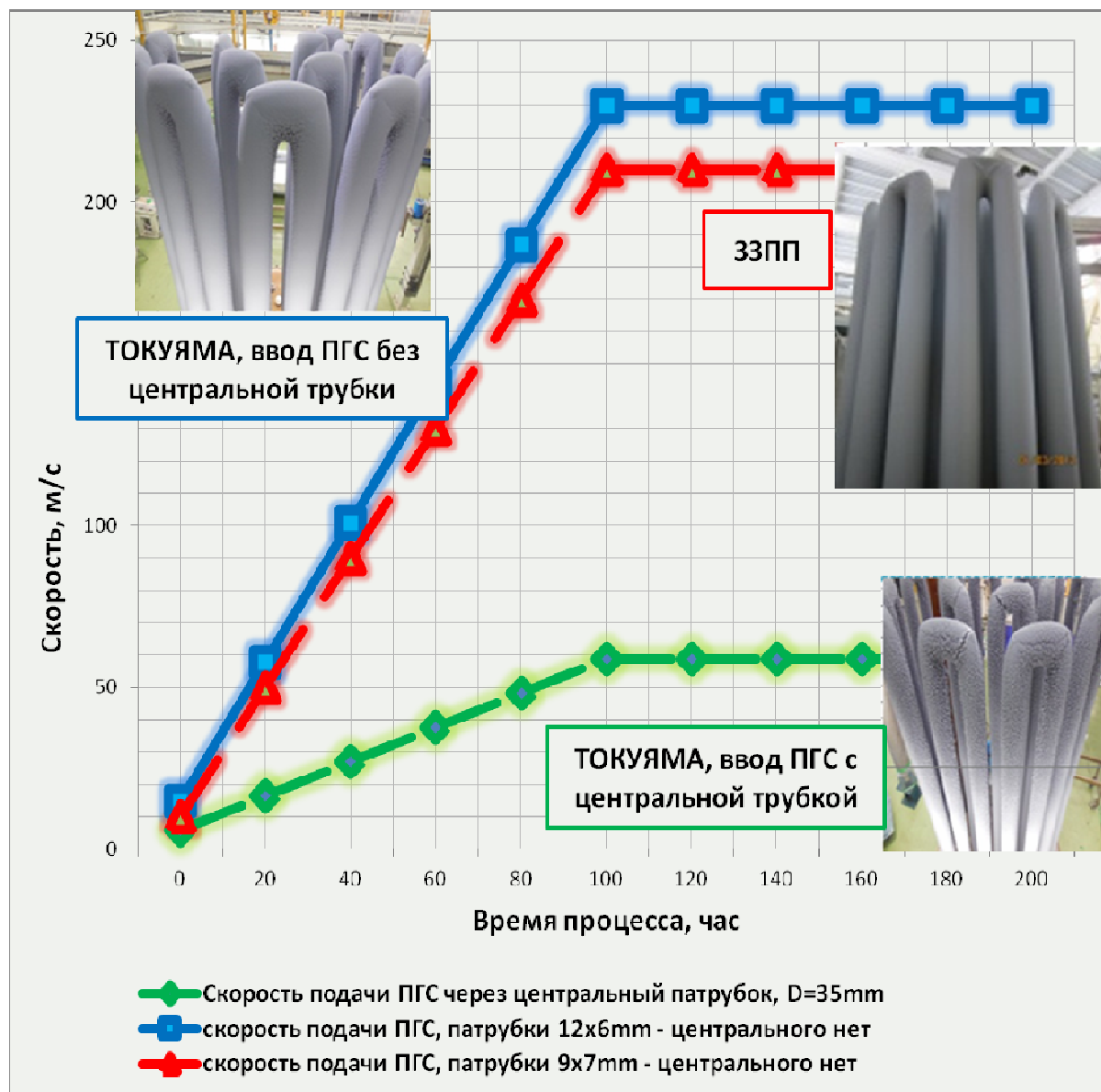


Рисунок 5 - Решение проблемы трещинообразования на перемычках U-образных блоков ПКК Siemens-реактора

Возможные варианты реализации регламентов подачи ПГС в реактор могут быть обеспечены схемами с различной компоновкой патрубков подачи-эвакуации парогазовой смеси (рис. 6).

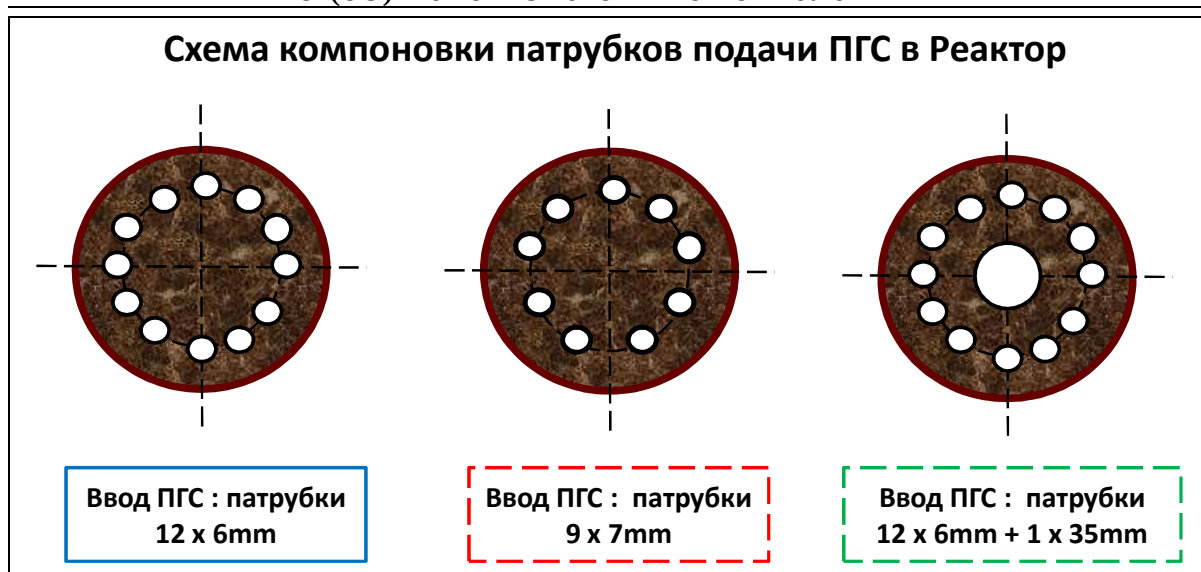


Рисунок 6 - Варианты схем компоновки патрубков подачи парогазовой смеси

Заключение. Высокая чувствительность процесса водородного восстановления ТХС к характеру протекания газодинамических потоков ПГС в реакторе при получении ПКК определяет необходимость моделирования процесса уже на стадии проектирования оборудования. Отработка решений на модели сокращает период ввода оборудования в эксплуатацию, минимизирует затраты обеспечивает его выход на проектную мощность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология полупроводникового кремния/Фалькевич Э.С., Пульнер Э.О., Червонный И.Ф., Шварцман Л.Я., Яркин В.Н. – М.:МЕТАЛЛУРГИЯ, 1992. - 408с.
Режим доступа: <http://www.bookshare.net/index.php?author=falkevich-es&book=1992&category=electrotech&id1=4>
2. Оптимизация процесса выращивания кремниевых основ для производства поликристаллического кремния / Реков Ю.В., Червонный И.Ф., Егоров С.Г., и др.// Прикладная физика и Материаловедение. 2011 -3/15-19.
Режим доступа:http://cyberleninka.ru/viewer_images/14427969/p/1.png
3. Алгоритм управления Siemens-Реактором производства поликристаллического кремния / Козин К.А., Горюнов А.Г., Левинцев С.Н., и др.//Известия Томского политехнического университета, 2009. №5 /том 315/с.70 – 74.
Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sistemy-avtomaticheskogo-upravleniya-rezistivnym-nagrevom-kremnievyh-sterzhney-peremennym-tokom>
4. Пат. США 20090229991 А1, Устройство и способ для получения равномерного распределения температуры в кремниевых стержнях во время процесса осаждения / Peter Wallmeier– US 12/400,984;заявл. 10.03.09; опубл. 17.09.09.
Режим доступа:<http://www.google.com/patents/US20090229991>