

УДК 621.315.592.2:66.012.1

Л.Я. Шварцман, Э.А. Троценко, Е.В. Баженов, П.Е. Баженов
**ОЦЕНКА СПОСОБОВ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ
КРЕМНИЯ, КАК УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
SIEMENS-РЕАКТОРОМ**

Аннотация. Выполнен анализ параметров управления процессом водородного восстановления трихлорсилана в «Siemens-Реакторе». Предложен новый способ определения управляемого параметра, что устраняет увеличение абсолютной ошибки его измерения по мере ведения процесса.

Ключевые слова: идентификация, адекватность, методическая ошибка, поликристаллический кремний, Siemens-Реактор, скорость осаждения кремния, диаметр стержня, скорость роста диаметра, абсолютная ошибка.

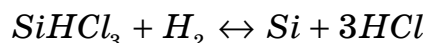
Поликристаллический кремний (ПКК) в виде стержней получают осаждением кремния в **Реакторах** водородного восстановления трихлорсилана (**ТХС**). Современный уровень технологии определен реализацией процесса в «Сименс-реакторах»[1], обеспечивающей приемлемые технико-экономические показатели производства и предоставляющей ряд существенных преимуществ в сравнении с альтернативными схемами:

- технологическая простота и невысокая себестоимость исходного получения расходуемого в реакторереагента - ТХС;
- возможность эффективной очистки ТХС до требуемого уровня чистоты, обеспечивающего соответствие заданному качеству конечного продукта;
- обеспечение высокой скорости осаждения кремния в процессе формирования поликристалла;
- обеспечение высокого уровня извлечение кремния из ТХС, достигаемого в процессе.

Несмотря на преимущества технологической схемы, реализуемой на базе Сименс-реактора, ставшей своего рода мировым стандар-

том в результате многолетнего совершенствования, процесс поиска улучшения технологии продолжается. Направления поиска - оптимизация как общей технологической схемы во всем объеме технологических операций и переделов, так и в направлении совершенствования непосредственно процесса в самом реакторе.

Метод получения поликристаллического кремния в Сименс-реакторах водородного восстановления ТХС основан на реакциях, в обобщенном виде представляемых формулами:



Разнообразие схем управления процессом в Сименс-реакторах сводится к управлению технологическим параметром - **скоростью осаждения кремния в соответствии с создаваемыми условиями в реакторе для соответствующей стадии процесса** (выходящая переменная - при описании процесса как объекта автоматизации). Реализуется управление процессом путем регулирования параметров (входящие переменные):

- объемная скорость подаваемой в реактор парогазовой смеси (ПГС);
- давление подаваемой в реактор ПГС;
- мольное соотношение реагентов $\text{SiHCl}_3:\text{H}_2$ в ПГС;
- температура нагрева стержней ПКК (функция токовой нагрузки).

Критерием оптимизации скорости осаждения кремния является ее максимизация в ограничениях, обеспечивающих заданное качество получаемого поликристалла для условий, определяемых стадией процесса. Основным параметром объективного управления процессом является скорость осаждения кремния.

В силу особенностей процесса в Сименс-реакторе, скорость осаждения кремния вычисляется по косвенным параметрам - по геометрическим размерам стержня [2], по весу, по токовой нагрузке [1,3], или возможным прочим контролируемым параметрам процесса на основании их функциональной связи со скоростью осаждения кремния [4].

Вычисление скорости осаждения кремния в широком смысле является задачей многофакторного анализа, определяемого стохастическим характером влияющих на процесс параметров (входящих переменных). Способы измерения этих параметров являются источником

методической погрешности оценки площади осаждения кремния (выходящей переменной). Как результат - в течение длительности процесса нарушается адекватность моделей управления.

Рассмотрим последствия этих погрешностей, в качестве примера, на схеме функциональной связи скорости осаждения кремния и текущего значения диаметра стержня. В настоящей работе выполнено исследование влияния стохастического характера диаметра стержня на определение оценки площади осаждения кремния - в ограниченном интервале времени при стабильных прочих условиях пропорционально определяющей скоростью осаждения кремния.

Введем обозначения.

D_{cm} - диаметр стержня поликристаллического кремния;

$D(h)$ - диаметр стержня ПКК в поясе с ординатой h (где $h = k \cdot H$ -, H - длина слитка, $k = \{0 - 1\}$ - коэффициент пропорциональности);

\bar{D} - приведенное среднее значение диаметра стержня ПКК, исходя из способа определения: по весу, путем прямого измерения диаметра $D(h)$, или др.;

$\Delta D(h)$ - отклонение значения диаметра $D(h)$ от \bar{D} в поясе с ординатой h стержня ПКК;

$\omega(h) = dD / dt$ - скорость роста значения диаметра $D(h)$ в поясе h стержня ПКК в момент времени t ;

S_{cm} - площадь боковой поверхности стержня поликристаллического кремния:

$$S_{cm} = f(D_{cm})$$

ΔS_{cm} - погрешность оценки S_{cm} .

Для определения ΔS_{cm} - погрешности оценивания S_{cm} путем вычисления площади боковой поверхности стержня по измеренному значению $D(h)$, а так же динамики ΔS_{cm} в зависимости от времени в течение процесса, рассмотрим взаимосвязь приведенных выше параметров (Рис. 1).

Задача вычисления объема стержня ПКК как цилиндра с плоским основанием решается путем определения двойного интеграла, ограниченного поверхностью некоторой поверхностью [5].

В рассматриваемом случае это цилиндр, основанием которого является замкнутая область $F(h, h = 0) \in xOy$ и имеющий ограничение сверху поверхностью $h = f(x, y)$. Объем цилиндра (Рис. 1, а) определяется выражением:

$$V = \iint_F f(x, y) dx dy = \iint_F f(x, y) dS = \lim_{F \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n dhi \cdot \Delta Si \quad (1)$$

где dhi - размер выделенной элементарной области по оси h , ΔSi - площадь выделенной элементарной области внутри плоскости сечения $S(h) \in xhiy$.

Источники методической погрешности измерения диаметра слитка в Siemens-реакторе

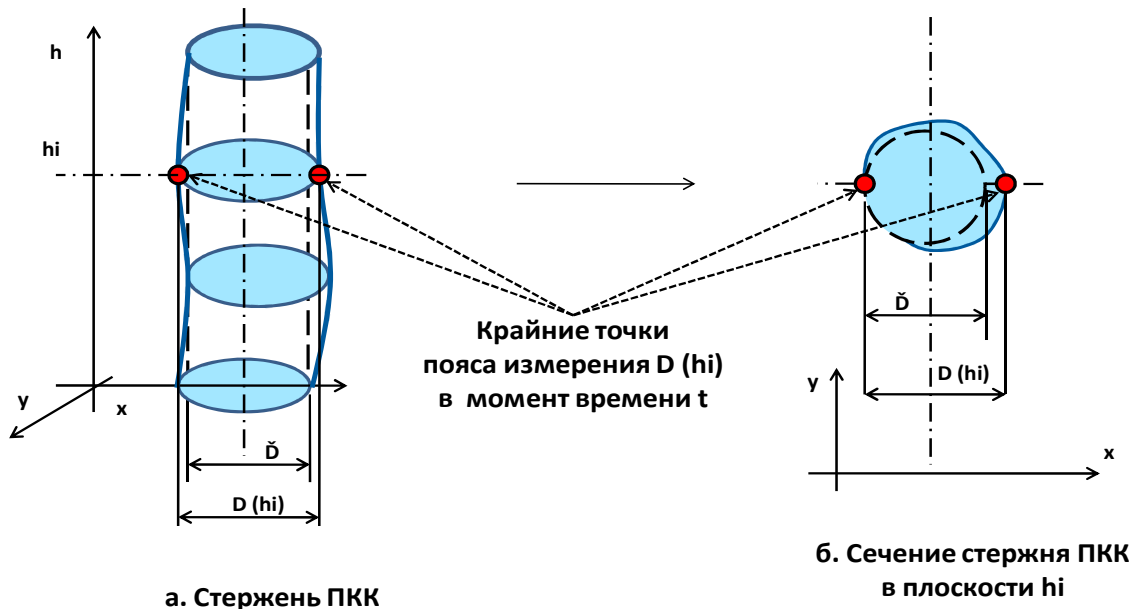


Рисунок 1 - Схема измерения диаметра стержня ПКК в реакторе

После несложных преобразований может быть получено эквивалентное выражение:

$$V = \int_{h0}^H S(h) dh \quad (2)$$

где $S(h)$ - площадь сечения цилиндра в плоскости h .

ПриведенноесреднеезначениедиаметрастержняПКК \check{D} может быть определено

$$\check{D} = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot H}} \quad (3)$$

Площадь боковой поверхности цилиндра определяется выражением:

$$S_{cm} = \int_{h_0}^H L(h) dh \quad (4)$$

где $L(h)$ длина линии, огибающей площадь сечения цилиндра в плоскости h .

Наравне с (4) площадь боковой поверхности цилиндра может быть определена выражениями:

$$S_{cm} = V / H \quad (5)$$

где V - объем цилиндра, получаемый из соотношения(1), и

$$S_{cm} = \pi \cdot \check{D} \cdot H \quad (6)$$

Так как величина H является величиной детерминированной, то не представляет интереса для анализа методологической погрешности оценивания ΔS_{cm} .

Таким образом, имеется возможность однозначного определения S_{cm} (используя полученное по (1) значение V - по формуле (5), или полученное по (3) значение \check{D} - по формуле (6)). Погрешность оценки S_{cm} будет определяться кроме точности, обеспечиваемой системой измерения исходного параметра (V или \check{D}), так же и методикой пересчета измеренных параметров в оценку S_{cm} . Рассмотрим это на примере оценки S_{cm} по значению \check{D} .

В реальных условиях измерение $D(h)$ является точечным, “привязанным” к определенному поясу стержня hi . Принимая измеренное значение диаметра стержня $D(hi)$ за \check{D} , т.е. $\check{D} = D(hi)$, происходит введение в оценку S_{cm} , методической погрешности. Из схемы сечения цилиндра Рис. 1, б видно, что площадь сечения цилиндра в плоскости hi и площадь, определяемая по приведенному среднему диаметру \check{D} - в общем случае не совпадают по значению. Величина погрешности:

$$\Delta D(hi) = D(hi) - \check{D} \quad (7)$$

Исходя из (6) ошибка определения S_{cm} составит:

$$\Delta S_{cm} = \pi \cdot D(hi) \cdot H - \pi \cdot \check{D} \cdot H = \pi \cdot \Delta D(hi) \cdot H \quad (8)$$

при измерении диаметра стержня $D(hi)$ в поясе hi .

$D(hi)$ - величина случайная, нормально распределенная со значением математического ожидания $m(D(hi)) = \bar{D}$ - что является следствием методики определения \bar{D} (формулы (1) – (3)). Указанный характер распределения случайной величины $D(hi)$ справедлив:

– как для $\forall t, t_0 < t < tk$, (где t_0 - начало процесса, tk - окончание процесса) при определении выборки по всем значениям hi ($hi \in \{hi = 0; hi = H\}$)

– так и для $\forall hi, 0 < hi < H$ при определении выборки по всем значениям t , когда $t \rightarrow \infty$.

В реальном процессе эти условия невыполнимы (измерение $D(hi)$ выполняется для единственного значения hi , и ограничено во времени). Отсюда следует вывод о значимости отклонений $D(hi)$ от \bar{D} в ограниченных интервалах времени, что и является источником методической ошибки в оценивании параметра ΔS_{cm} , являющегося входным параметром системы управления технологическим процессом.

Наличие методической погрешности определения параметра ΔS_{cm} приводит к ее накоплению во времени, как следствие суммирования погрешностей случайных величин [6]. Влияние наличия методической ошибки измерения диаметра стержня D_{cm} на ΔS_{cm} во временном разрезе показано на рис.2.

Устойчивое положение параметра вне зоны допустимых значений визуализирует наличие методической ошибки.

Такие следствия особо негативно сказываются на управлении процессом на завершающих стадиях - так как при больших значениях D_{cm} управление переходит в диапазон регулирования больших объемных скоростей подачи ТХК в реактор, что приводит к усилению дифференциации условий осаждения кремния для локальных зон - формируя устойчивую тенденцию роста дисперсии значений $D(hi)$. Следствия практического характера - усиление неравномерности осаждения кремния вдоль направляющей стержня, формирование условий для нежелательных реакций и соответственно увеличение вероятности аварийного завершения процесса.

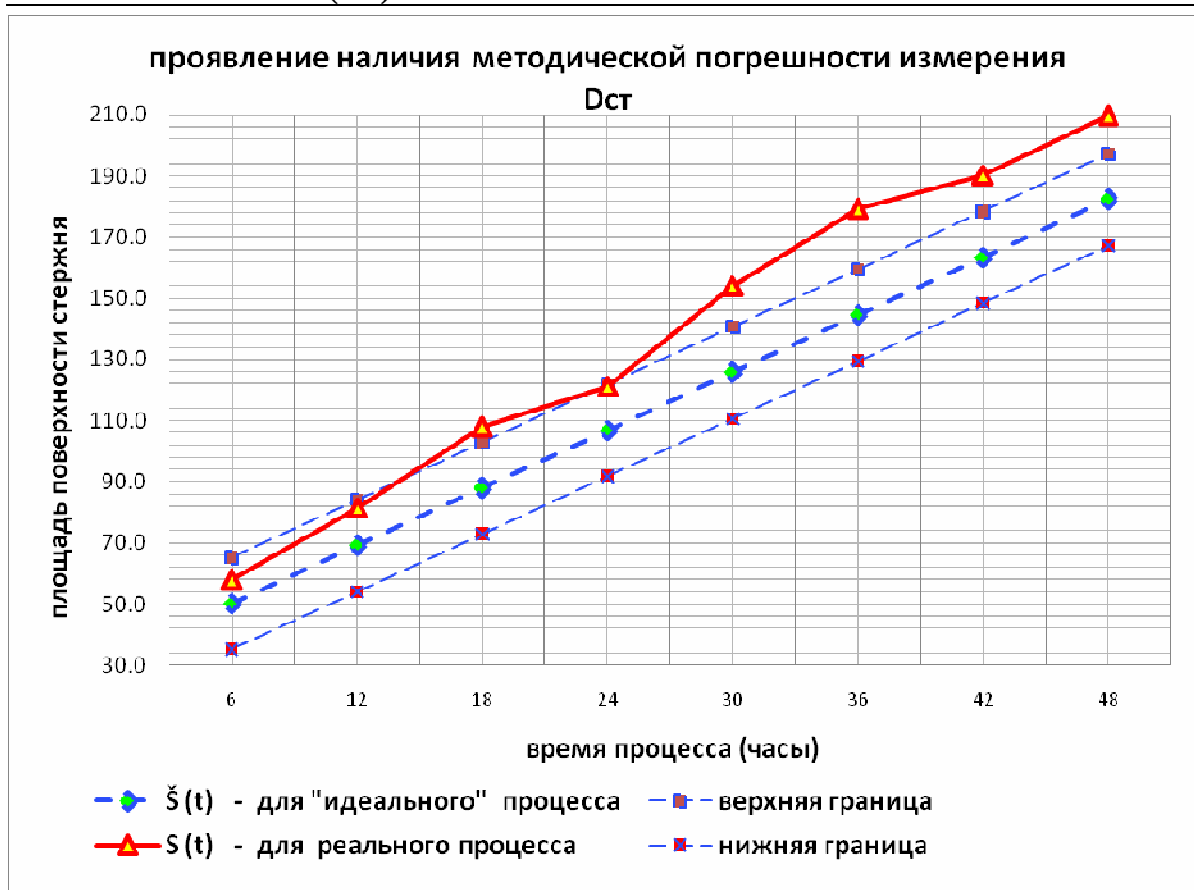


Рисунок 2 - Влияние методической ошибки измерения диаметра стержня ПКК в реакторе на вычисляемую оценку площади осаждения

Пример временной зависимости погрешности управляемой переменной ΔS_{cm} - при отсутствии и наличии методической ошибки измерения (вычисления) этой переменной - приведен на Рис.3. Оценки погрешности получены на имитационной модели. На рисунке приведены графики оценок соответствующих погрешностей, и графики линейных трендов этих оценок. Характерным следствием наличия методической погрешности измерения является увеличение дисперсии оценок - что хорошо видно на приведенных графиках и продемонстрировано вычисленными дисперсиями погрешностей. Введение дополнительной методической погрешности в процедуру измерения привело к резкому, в 2,87 раза, росту дисперсии измерений.

Объективное наличие неточности способов определения, а также влияние определенного уровня случайностей на вычисление/измерение ΔS_{cm} являются источниками, ограничивающим сегодня качество регулирования процессом.

Необходимо указать на еще одно негативное следствие ведения управления процессом по данным прямого измерения диаметра стержня поликристаллического кремния, проявляемому на больших значениях D_{cm} . Таким следствием является пропорциональный рост абсолютной погрешности $\Delta D'(hi)$ измерения D_{cm} :

$$\Delta D'(hi) = \delta \cdot D(hi) \quad (9)$$

где δ - относительная погрешность системы измерения диаметра стержня.

Таким образом, по совокупности изложенного можно сделать вывод, что даже при наличии высокоточного канала измерения D_{cm} , применение получаемой оценки будет потенциально ограничено по достигаемым показателям точности и качества регулирования в управлении процессом осаждения кремния.

Для “осязания” полученных выводов выполним расчет методической погрешности для одного из этапов процесса водородного восстановления в Реакторе получения ПКК. Для упрощения вычислений - будем считать случайную величину $\Delta D(hi)$ (см. (7)) таковой, что распределена по нормальному закону $N(0, \delta^2)$ - где 0 есть математическое ожидание случайной величины, δ^2 - дисперсия случайной величины [6]. Принятое допущение приведет к тому, что нами будет получена наименьшая оценка искомого значения ошибки. Плотность вероятности случайной величины $\Delta D(hi)$ для $\forall t, t_0 < t < t_k$ (где t_0 - начало процесса, t_k - окончание процесса) имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \bar{D})^2}{2 \cdot \delta^2}\right), \quad (10)$$

где x введено для упрощения записи, и $x = \Delta D(hi)$.

Оценка будет выполнена для поздних стадий процесса, например для момента времени, когда в точке измерения $D(hi) = 120$ мм. Выполнив замеры диаметра стержня, были определены значения $D_{\max} = 122$ мм и $D_{\min} = 97$ мм. Исходя из свойств N-распределения - а именно используя правило 6δ - получим количественную оценку δ : $6\delta = D_{\max} - D_{\min} = 121 - 97 = 25$ мм, откуда $\delta = 25 / 6 = 4,7$ (мм).

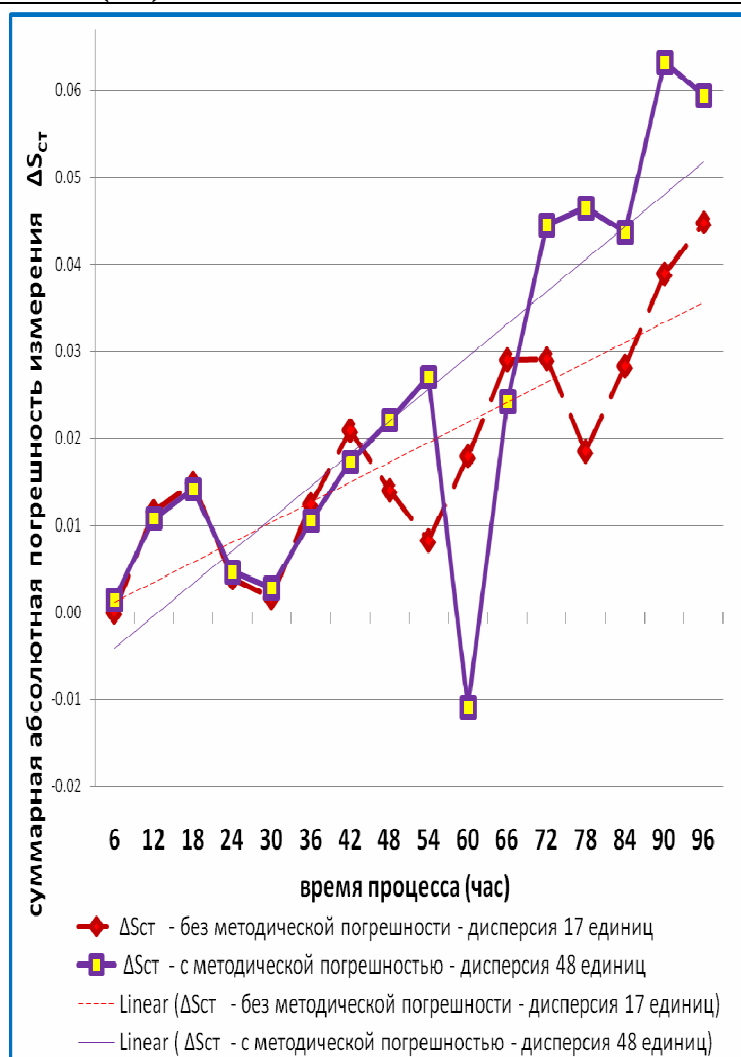


Рисунок 3 - Динамика ошибок измерения диаметра стержня ПКК в реакторе

Принимая $\check{D} = D(hi)$ и исходя из свойства N-распределения о том, что максимально вероятное отклонение случайной величины от ее математического ожидания равно σ - получим значение наиболее вероятной величины оценки $\Delta D(hi) = \delta = 4.17(\text{мм})$.

Полученная методическая погрешность многократно (в разы) превышает часовую скорость наращивания диаметра стержня (до 1 мм в час), что наглядно демонстрирует справедливость выводов о проблематичности использования измерения $D(hi)$ для оценки S_{cm} и, соответственно, для прогнозирования скорости осаждения кремния.

Повысить качество управления можно путем измерения первой (dD/dt) (а лучше и второй (d^2D/dt^2) производной (производных) D_{cm} по времени. Решение проблемы в этом направлении позволит

устранить зависимость управляемого параметра от доминирующего случайного фактора - местоположения измеряемой характеристики.

Введением прямого измерения скорости роста диаметра слитка dD/dt (именно прямого, независимого измерения скорости наращивания диаметра стержня, а не дифференцирование измеряемого параметра $D_{сл}$) обеспечивается значительное подавление (вплоть до полного исключения) методической ошибки в оценивании параметра dD/dt . Перестройка моделей, по которым ведется управление процессом, на использование в качестве параметра регулирования - скорости роста диаметра слитка dD/dt - позволит повысить уровня адекватности моделей и соответственно точность управляющего воздействия. Кроме прочего, появляется возможность управлять процессом и по производной более высокого порядка - по d^2D/dt^2 . Схема, реализующая прямое измерение скорости наращивания диаметра стержня ПКК путем измерения скорости перемещения точки, расположенной на визуальной кромке боковой поверхности стержня поликристалла приведена, на рис. 4.

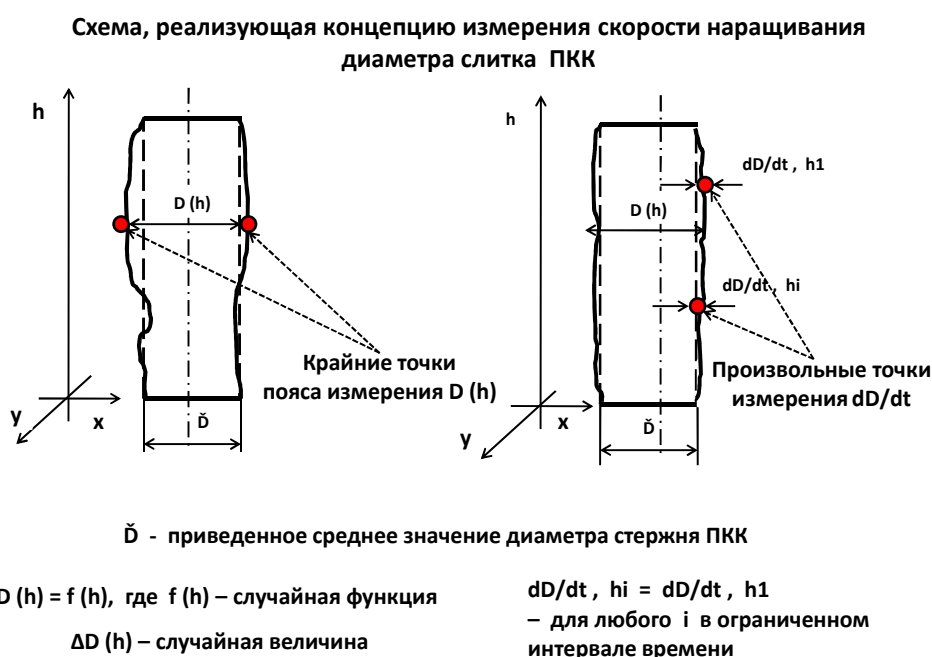


Рисунок 4 - Прямое измерение скорости наращивания диаметра стержня ПКК

Дополнение системы управления процессом в Реакторе водородного восстановления прямым измерением в реальном времени скорости роста диаметра слитка позволит:

- устранить зависимость погрешности измерения от стадии процесса;
- значительно уменьшить перерегулирование процессом;
- повысить степень усреднения условий осаждения кремния как по длине слитка, так и для различных зон Реактора;
- повысить однородность слитка по его длине;
- без ухудшения качества ПКК увеличить производительность процесса;
- сократить количество аварийно завершенных процессов.

Предложенное решение обеспечивает оперативный технологический персонал эффективным инструментом определения (непосредственно по ходу промышленного процесса) по скорости осаждения - скорости извлечения кремния из ПГС и текущего значения диаметра стержня. Указанная возможность позволяет оптимизировать газодинамические режимы в реакторе на различных стадиях процесса, что особенно актуально при завершении процесса, когда расходные характеристики резко возрастают.

Укажем, что совершенствование способа управления ростом стержня ПКК связано с целым рядом технических проблем прямого измерения геометрических параметров стержня в Реакторе, течение процесса. Выделим одну из них – проблема идентификации местоположения и перемещения визируемой кромки боковой поверхности стержня на фоне, создаваемом соседними стержнями (рис. 5).



Рисунок 5 - Визуальное наблюдение разогретых стержней
ПКК в Реакторе

Проблема осложнена условиями ведения измерения, основные из которых - изменяющаяся прозрачность окна наблюдения и условия взрывопожароопасности на производственном участке. Эффек-

тивное решение проблемы видится в применении оптоволоконных систем видеонаблюдения и алгоритмов цифровой обработки видеoinформации.

Заключение. Выполнен анализ источников погрешности, возникающей при измерении управляемых параметров процесса водородного восстановления ТХС в Реакторе получения ПКК. Определена методика, позволяющая оценивать влияние методических ошибок измерения диаметра стержня на скорость осаждения кремния. Полученные результаты позволяют утверждать об ограничениях в направлении развития управления процессом по параметрам, определяемым по каналу измерения диаметра стержня. В качестве перспективного - с точки зрения повышения адекватности используемых в управлении моделей и качества регулирования - предложен способ измерения скорости осаждения кремния по скорости роста диаметра стержня, определяемой в ходе прямого измерения перемещения видимой кромки стержня ПКК.

Предлагаемый подход обеспечивает уменьшение зависимости абсолютной ошибки измерения от стадии процесса - что характерно для методов, ориентированных на измерение диаметра стержня (слитка). Эта зависимость, и что - в высшей степени отрицательно - сказывается на поздних этапах ведения процесса, когда диаметр стержня имеет значительные габариты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология полупроводникового кремния / Фалькевич Э.С., Пульнер Э.О., Червоный И.Ф., Шварцман Л.Я., Яркин В.Н., Салли И.В. – М.: Металлургия, 1992.- 408 с.
2. Гашенко С.И., Девяткин Б.Д., Дегтярик Н.В., Тимченко И.М.//Цветные металлы. 1970. №7. с. 56-57.
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.
4. Бочкарев Э.П., Иванов Л.С., Прокошин В.Д. // Исследования в области полупроводниковых материалов. – М.:ГИРедМет, 1983. с. 104 – 109.
5. Фильчаков П.Ф. Справочник по высшей математике. – Киев, “Наукова думка”, 1974. – 743 с.
6. Коваленко И.Н., Филиппова А.А. Теория вероятностей и математическая статистика. – М:”Высшая школа”, 1973. – 368с.