

**1.3. ИЛМҲОИ ФИЗИКА**  
**1.3. ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ**  
**1.3. THE PHYSICS SCIENCES**

1.3.8. Физикаи ҳолатҳои конденсӣ  
1.3.8. Физика конденсированного состояния  
1.3.8. Physics of condensed state

УДК 621.382:669.782  
ББК 22.37

**КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ И  
УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ  
ОСАЖДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ИЗ  
ГАЗОВОЙ ФАЗЫ**

*Касымов Далер Абдукадырович – соискатель  
кафедры электроники ГОУ «ХГУ имени  
академика Бабаджана Гафурова», e-mail:  
[kosimov.ygt@gmail.com](mailto:kosimov.ygt@gmail.com)*

**НАЗОРАТИ ПАРАМЕТРҲО ВА  
ИДРАКУНИИ РАВАНДИ  
РЕХТАНИ БУҒИ НИМНОҚИЛҲО  
АЗ ФАЗОИ ГАЗҲО**

*Қосимов Далер Абдуқодирович – унвонҷӯи  
кафедраи электроникаи МДТ-и «ДДХ ба номи  
академик Бобожон Гафуров», e-mail:  
[kosimov.ygt@gmail.com](mailto:kosimov.ygt@gmail.com)*

**CONTROL OF PARAMETERS AND  
MANAGEMENT OF THE  
SEMICONDUCTOR VAPOR DEPOSITION  
PROCESS FROM GAS PHASE**

*Qosimov Daler Abdukadirovich - Degree  
Applicant of the Department Electronics of the PEI  
«KSU named after academic Bobojon Gafurov», e-  
mail: [kosimov.ygt@gmail.com](mailto:kosimov.ygt@gmail.com)*

**Ключевые слова:** водородное восстановление, газовая фаза, слой литого поликремния.

Дается краткий обзор самого распространенного на практике способа получения полупроводниковых материалов, в том числе, кремний-водородное восстановление галогенидов из газовой фазы. Приведены данные о формировании парогазовой смеси в производственных условиях, но также и в диапазоне варьирования исходных параметров процесса. Подчеркивается ценность полученных результатов для получения солнечных элементов из вторичного литого поликремния

**Вожаҳои калидӣ:** барқароркунии гидроген, фазаи газ, қабати рехташудаи поликремний.

Шарҳи мухтасар дар бораи усули дар амал маъмултарини ба даст овардани материалҳои нимноқилӣ, аз ҷумла редуксияи кремний-гидрогени галогенидҳо аз фазаи газ оварда шудааст. Маълумот дар бораи ба вуҷуд омадани омехтаи буғ-газ дар шароити истеҳсолот, инчунин дар доираи вариацияи параметрҳои процесси ибтидоӣ дода мешавад. Арзиши натиҷаҳо, ки дар истеҳсоли батареяҳои офтобӣ аз полисилициони дуюмдараҷаи рехташуда ба даст оварда шудаанд, кайд карда мешавад.

**Key words:** hydrogen reduction, gas phase, cast polysilicon layer.

A brief review is given of the most common in practice method for obtaining semiconductor materials, including silicon-hydrogen reduction of halides from the gas phase. Data are given on the formation of a vapor-gas mixture under production conditions, but also in the range of variation of the initial process parameters. The value of the results obtained in the production of solar cells from secondary cast polysilicon is emphasized.

Осаждение из газовой фазы в процессах водородного восстановления галогенидов является одним из самых распространённых на практике способов получения кремния, германия, бора, а также ряда металлов, находящих применение в электронной технике, как напрямую, так и в качестве легирующих компонентов для вышеупомянутых полупроводников [1,2]. Необходимо отметить, что процесс водородного восстановления применяется, как для изготовления массивных кристаллов, например, поликристаллического кремния – сырца [3], так и для получения разнообразных плёночных

структур [4]. Наиболее распространены кремниевые однослойные эпитаксиальные структуры (КОЭС) и кремниевые структуры с диэлектрической изоляцией (КСДИ) - являющиеся основным полуфабрикатом для производства изделий микроэлектроники. Находят применение в микроэлектронике и гетероэпитаксиальные структуры, плёнки и подложки в которых выполнены из различных полупроводниковых материалов [5]. Одними из разновидностей таких структур являются эпитаксиальные слои твёрдых растворов кремний – германий, осажденные на кремниевые подложки (ЭСТР Si-Ge/Si), содержащие, как одинаковую по толщине плёнки концентрацию Ge, так и изменяющееся, обычно возрастающее к свободной поверхности пленки, содержание германия.

Для управляемого получения Si-сырца, КОЭС, КСДИ или гетероструктур с заданными электрофизическими характеристиками необходимо обеспечить точное задание и поддержание в течение всего технологического цикла величины основных параметров операции осаждения кремния из газовой фазы, включая температуру поверхности осаждения, расход или линейную скорость перемещения парогазовой смеси (ПГС) вдоль поверхности осаждения и содержание в ней галогенидов кремния, наиболее применимыми из которых являются трихлорсилан ( $\text{SiHCl}_3$ ) и тетрахлорид кремния ( $\text{SiCl}_4$ ) [6-8].

При получении КОЭС, в особенности с тонкими, ~3-5 мкм, эпитаксиальными слоями, используемыми, например, для изготовления полевых транзисторов, необходимо также обеспечить высокое качество и плоскостность поверхности исходных подложек, а значит и заданную скорость травления поверхности подложек хлористым водородом (HCl), зависящую от содержания HCl в ПГС и температуры подложек.

В работе приведены данные о формировании ПГС и кинетике основных операций получения КОЭС и КСДИ в условиях максимально приближенных к производству, но в диапазоне варьирования исходных параметров процесса, перекрывающем обычно применяемые на практике режимы. Эксперимент проведен на современном промышленном ростовом оборудовании типа УНЭС -2 ПВМ и УНЭС -2 ПКА, содержащих по два реакторных отсека с проточными вертикальными, водоохлаждаемыми реакторами, выполненными, соответственно, из плавленого кварца и нержавеющей стали 6Х18Н10Т.

На рис.1 приведена упрощенная газовая схема универсальной установки для получения КОЭС, КСДИ или гетероструктур Si-Ge/Si. Видно, что поступающая в реактор ПГС формируется в системе с испарителями барботажного типа, термостатируемыми при заданной температуре, через которые пропускается несущий газ водород, а расход водорода через каждый испаритель и его расход в байпасной, то есть разбавляющей линии обычно определяют с помощью поплавочных ротаметров.

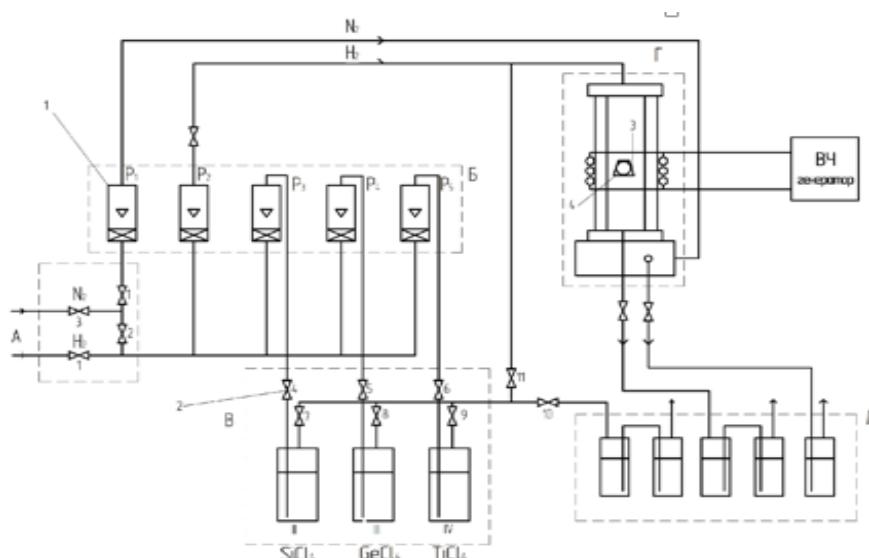


Рис.1 Схема установки наращивания эпитаксиальных слоев твердых растворов кремний-германий с легированием примесью титана. 1. 1-17 вентили,  $P_1$ - $P_6$ - ротаметры. Блоки; А- газораспределительный; Б-ротаметров, В-испарители, Г-реакторный, Д-сброс, масляные затворы на скруббер.

Расчет содержания того или иного компонента в ПГС для системы с несколькими испарителями (рис.1), частным случаем которого является выражение для концентрации отдельного компонента, например,  $\text{SiCl}_4$  и одного испарителя, на практике обычно ведут с использованием формулы Амрона (1) [9]

$$C = \frac{P_m f}{(P - P_m)(F + f)} \quad (1)$$

где  $P_m$  - давление насыщенного пара тетраоксида кремния при заданной температуре испарителя;  $P$  - давление в системе;  $F$  - разбавляющий поток газа носителя;  $f$  - поток газа-носителя через испаритель.

На практике используют и другое выражение (2), также полученное Амроном

$$C = P_n f / \{F(P - P_n) + fP\} \quad (2)$$

Из анализа выражения (1) следует, что при  $P = P_m$ , а это легко достигается на практике для  $\text{SiCl}_4$  и  $\text{SiHCl}_3$ , имеющих сильную зависимость давления паров от температуры, их концентрация в ПГС становится равной бесконечности ( $C = \infty$ ). По выражению (2) в этом случае  $C = 1$  вне зависимости от соотношения и величины потоков газа-носителя через испаритель и в байпасной линии, а также суммарного потока водорода в реактор.

Нетрудно видеть, что это не имеет физического смысла. Амрон [9] проводил расчет по каждому испарителю из предположения о замкнутом объеме, в то время как любое оборудование для осаждения из газовой фазы представляет собой открытую, проточную систему, что хорошо видно на схеме рис.1, согласно которой ПГС формируется в блоке испарителей, проходит реакторный блок, где из нее в результате водородного восстановления выделяют часть искомого полупроводника или легирующего компонента, а затем остатки и газообразные продукты реакции в виде  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{SiHCl}_3$ ,  $\text{SiCl}_2$ ,  $\text{SiCl}_4$ , и т.д. пропускаются через блок сброса (д) на скруббер на нейтрализацию и дожигание водорода.

В частности, при выводе выражения (2) в [9] принято, что поток газа-носителя через испаритель равен

$$f = f_0 \frac{kT}{(P - P_m)}$$

где  $f_0$  - поток по данным ротаметра,  $T$ -температура в система  $K = P_T / T_T$ ;  $P_T$ ,  $T_T$  - давление и температура при тарировке ротаметре. Такого в проточной системе быть не может. Поток газа носителя через испаритель-это и есть собственно поток, измеряемый ротаметром.

Проведем более строгий расчет состава ПГС и сделаем это с учетом реального избыточного давления в испарителе, возникающего вследствие сопротивления газовых коммуникаций на пути из испарителя к реактору и от реактора к скрубберу. Рассмотрим систему с  $n$  параллельно включенными испарителями и  $j$ -компонентами, аналог варианта, приведенного на рис.1.

Сделаем следующие допущения:

- в системе справедливы законы идеального газа;
- жидкости в испарителях полностью взаимно растворены;
- насыщение  $\text{H}_2$  компонентами происходит в полном соответствии с их равновесным парциальным давлением.

В такой системе разбавляющий поток в реактор равен

$$F'_0 = F_0 \frac{P_0}{T_0} \cdot \frac{T}{P},$$

где  $F_0$ - поток по данным ротаметра  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $P_0$  - давление в ротаметра,  $\text{н}/\text{м}^2$ ;

$P$ - давление в реакторе,  $\text{н}/\text{м}^2$ ;  $T$  – температура  $\text{H}_2$  в реакторе,  $\text{К}$

Поток  $\text{H}_2$  в  $j$ -тый испаритель в этих условиях будет равен (3)

$$f'_i = f_i \frac{P_{pi}}{T_0} \cdot \frac{T_i}{P_i} \quad (3)$$

где  $f_i$ - поток по данным ротаметра  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $P_{pi}$  - давление в ротаметра,  $\text{н}/\text{м}^2$ ;

$T_i$ ,  $P_i$ - температура и давление в испарителе. Поток  $\text{H}_2$  из  $i$ -того испарителя в реакторе равен,  $\text{н}/\text{м}^2$ ;  $T$  – температура  $\text{H}_2$  в реакторе,  $\text{К}$ .

$$f_i' = f_i' \frac{P_{pi}}{T_0} \cdot \frac{T}{P}$$

$$F = F_0' + \sum_{i=1}^n f_i' \text{ т.е.}$$

$$F = \frac{T}{PT_0} \left( Pp_0 F_0 + \sum_{i=1}^n f_i Pp_i \right)$$

Для одного испарителя по закону Бойля-Мариотта можно записать соотношение (4):

$$f_{\text{вых}} P_i = f_i' [P_i + \sum_{j=1}^m (x_j P_j)_i], \quad (4)$$

где  $f_{\text{вых}}$ - поток ПГС из испарителя, м<sup>3</sup>/с;  $(x_j)_i$ - концентрация  $j$ -той жидкости в  $i$ -том испарителе;  $P_j$  –давление насыщенных паров этой жидкости при  $T_i$ ;  $m$ -число жидких компонентов в системе. Из (4) следует

$$f_{\text{вых}} = f_i + \frac{f_i'}{P_i} \sum_{j=1}^m (z_j P_j)_i \quad (5)$$

Второе слагаемое в (5) отражает суммарный поток пара жидких компонентов из испарителя. Поток  $j$ -го компонентов из  $j$ -го испарителя, следовательно, равен

$$(f_j)_i = f_i' \frac{(x_j P_j)_i}{P_i},$$

а на входе в реактор с учетом (3)  $(f_j)_i = f_i \frac{P_{pi} T}{T_0 P_i P} (x_j P_j)_i$  Полный поток пара  $j$ -го компонента в реактор

$$f_j = \frac{T}{T_0 P} \sum_{i=1}^n f_i \frac{P_{pi}}{P_i} (x_j P_j)_i$$

Суммарные поток пара в реактор

$$f = \sum_{j=1}^m f_j \quad f = \frac{T}{T_0 P} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f_i \frac{P_{pi}}{P_i} (x_j P_j)_i$$

Отношение потока пара  $j$ -го компонента к общему потоку  $H_2$  определится как

$$\Pi_j = \frac{f_j}{F} \quad \Pi_j = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \frac{P_{pi}}{P_i} (x_j P_j)_i}{F_0 P p_0 + \sum_{i=1}^n f_i P_{pi}}$$

Мольная доля  $j$ -го компонента в парогазовой смеси в реакторе определяется отношением

$$M_j = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \frac{P_{pi}}{P_i} (x_j P_j)_i}{F_0 P p_0 + \sum_{i=1}^n f_i P_{pi} - \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f_i \frac{P_{pi}}{P_i} (x_j P_j)_i} \quad (6)$$

Пренебрегая изменением давления на участке от выхода ротаметра до входа в соответствующий ему испаритель, выражение (6) можно упростить

$$M_j = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \frac{P_{pi}}{P_i} (x_j P_j)_i}{F_0 P p_0 + \sum_{i=1}^n f_i P_{pi} - \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f_i \frac{P_{pi}}{P_i} (x_j P_j)_i} \quad (7)$$

Рассмотрим наиболее интересные для практики частные случаи.

Система с одним испарителем и одним компонентом. Мольная доля компонента в ПГС описывается выражением

$$M = \frac{f P_m}{F_0 P_0 + f P_u + f P_m}, \quad (7,1)$$

где  $F_0, f$  - потоки  $H_2$ , соответственно разбавляющий и в испаритель;  $P_0, P_u$ , - давление в линии разбавляющего потока (практически давление в реакторе, в испарителе,  $P_m$  - насыщенного пара компонента при данной температуре испарителя.

Система с двумя параллельно включенными испарителями, заполненными одним и тем же компонентом и термостатированными при одинаковой температуре. Концентрация равна

$$M = \frac{(f_1 + f_2)P_m}{f_0 P_0 + f_1(P_1 + P_m) + f_2(P_2 + P_m)} \quad (7,2)$$

где  $f_1, f_2, P_1, P_2$  – потоки и давления соответственно в первом и втором испарителях.

Система с двумя испарителями: в первом из них один компонент, во втором наряду с основным находится легирующий компонент в концентрации  $X$ . Мольная доля основного компонента равна

$$M_1 = \frac{f_1 P_{11} + f_2 P_{12}(1-X)}{F_0 P_0 + f_1(P_1 + P_{11}) + f_2[P_2 + P_{12}(1-X) + P_{22}X]} \quad (7,3)$$

где  $P_1, P_2$  - давление в 1 и 2 испарителях;  $P_{11}, P_{12}$  давление насыщенного пара основного компонента соответственно в 1-Ом и 2-Ом испарителях;  $P_{22}$ - давление насыщенного пара легирующего компонента, добавленного во 2-Ом испаритель. Мольная доля легирующего компонента равна

$$M_2 = \frac{f_2 P_{22}X}{F_0 P_0 + f_1(P_1 + P_{11}) + f_2[P_2 + P_{12}(1-X) + P_{22}X]} \quad (7,4)$$

Расчетные кривые по Амрону (2) и предложенной нами методике были сопоставлены с результатами прямых измерений концентрации тетрахлорида кремния в ПГС, проведенные методами:

- вымораживания паров  $\text{SiCl}_4$ , пропускаемых за определенный промежуток времени с последующим взвешиванием [10];
- взвешиванием испарителя  $\text{SiCl}_4$  в ходе эксплуатации при постоянной температуре и постоянном расходе водорода через него;
- по изменению уровня жидкого  $\text{SiCl}_4$  в испарителе в ходе его эксплуатации;
- с помощью прибора-анализатора состава ПГС [11].

Результаты сопоставления приведены на рис. 2 а,б. Видно, что расчет по (7) (сплошные кривые) близок к эксперименту, в то время расчет по (2) сильно противоречит экспериментальным данным. Расхождение расчета по (2) с экспериментом резко возрастает при повышении температуры испарителя выше  $0^\circ\text{C}$ . То есть, в диапазоне температур испарителя близких к комнатной и поэтому, вследствие относительной простоты обеспечения, наиболее употребляемом на практике грубая ошибка в оценке состава ПГС по (2) неизбежна. Это особенно хорошо видно из сопоставления расчетных и экспериментальных данных полученных при варьировании расхода водорода через испаритель, термостатированный при комнатной температуре (рис.2 б) Расчет состава ПГС по предлагаемой нами методике, наоборот, дает хорошую сходимость с экспериментом, поскольку учитывает реальные избыточные давления в реакторе и испарителе, что позволяет повысить воспроизводимость параметров наращиваемых структур между партиями, получаемых как на одной, так и на нескольких установках и, тем самым, снизить уровень брака в промышленном производстве КОЭС, КСДИ и другой продукции, изготовление которой ведется осаждением из газовой фазы. Конечно, задача повышения качества продукции и увеличения производительности оборудования в процессах водородного восстановления тетрахлорида кремния не исчерпывается только обеспечением контроля и поддержанием на заданном уровне состава ПГС. Не менее важен контроль и управление другими параметрами процесса, такими как общий расход ПГС через реактор, ее линейная скорость в зоне осаждения, температура эпитаксии. Понятно, что это требует решения сложной многофакторной задачи, связанной с изучением кинетики осаждения кремния из газовой фазы, выявления лимитирующих стадий и привязке полученных результатов эксперимента к конкретной технологической аппаратуре, отличающейся большим разнообразием

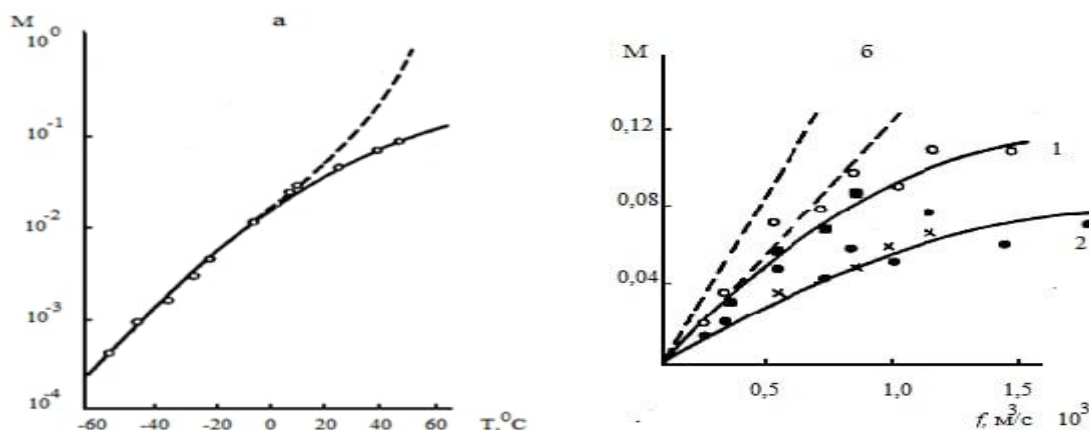


Рис. 2 Зависимости концентрации тетрахлорида кремния в ПГС (моль.доли.): от температуры испарителя при суммарном потоке  $H_2$   $6,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  и потоке через испаритель  $0,75 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  (а) и от расхода водорода через испаритель, термостатированный при 295 К (б) при суммарном потоке водорода  $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{сек}$  (1) и  $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{сек}$  (2); Пунктиром показан расчёт по Амрону [9]; Сплошные линии -расчет по предлагаемой методике (7). «белые» кружки – вымораживание  $SiCl_4$ ; черные квадраты – взвешивание испарителя; черные кружки – измерение состава ПГС с помощью прибора –анализатора  $SiCl_4$  в ПГС по теплопроводности [11]; крестики- оценка расхода  $SiCl_4$  по изменению уровня жидкого тетрахлорида кремния в термостатированном испарителе.

Для оптимизации решения этой задачи рекомендуем, во-первых, строить анализ и управление технологическим процессом исключительно по прямым показателям и, во-вторых, использовать регрессионные, математические модели отдельных операций технологического процесса, позволяющие вычлнять из обширного диапазона варьирования параметров, оптимальный. А оптимальными режимами операций, по нашему мнению, являются те, при которых с одной стороны обеспечивается достаточно высокая производительность, и имеет место ее минимальная чувствительность к изменению условий ведения процесса.

В качестве примера можно привести, построенные нами, математические модели операций газового травления (ГТ) кремниевых подложек, наращивания КОЭС и опорных поликристаллических слоев кремния для КСДИ, позволяющие прогнозировать скорости этих операций в системе ( $H_2$ -HCl –  $SiCl_4$ ) применительно к уже ранее упомянутым промышленным установкам УНЭС – 2ПМ и УНЭС – 2ПКА,

Для построения модели операции ГТ на пьедестал загружали ранее наращенные КОЭС  $\varnothing$  76 мм типа  $n-n^+$ ,  $n-p$  с толщиной эпитаксиального слоя  $\sim 45$  мкм. Диапазон варьирования основных параметров процесса ГТ выбирали в следующих пределах: расход парогазовой смеси ( $x_1$ ) -  $80 \div 120$  л/мин; концентрация безводного HCl в ПГС, ( $x_2$ ) -  $2 \div 5$  % об; температура поверхности подложек, ( $x_3$ ) -  $1200 \div 1300$  °C.

Для указанного диапазона путем реализации матрицы планирования эксперимента типа  $2^3$  с трехкратным дублированием опытов построена регрессионная модель операции ГТ, имеющая в натуральных переменных вид

$$V = -1,3761129 + 0,0287763X_1 - 1,2592666X_2 + 1,0731x \cdot 10^{-3}X_3 + 5,6374 \cdot 10^{-3}X_1X_2 - 2,76 \cdot 10^{-5} X_1X_2 + 9,645 \cdot 10^{-4} X_1X_2 \quad (8)$$

Модель (8) с точностью  $\pm 5\%$  описывает скорость ГТ кремния и может быть положена в основу построения номограмм этой операции на УНЭС - 2ПКА в диапазоне скоростей ГТ  $0,3 \div 2,5$  мкм/мин. Из сопоставления скоростей ГТ на УНЭС – 2ПКА и УНЭС 2ПВМ - установке, достаточно хорошо освоенной промышленностью, следует, что в одинаковых условиях проведения операции, включая сопоставимые линейные скорости ПГС в рабочей зоне, скорость ГТ на УНЭС – 2ПКА несколько ниже, а однородность обработки пластин по высоте пьедестала выше, чем на УНЭС – 2ПВМ.

Кинетику роста эпитаксиальных слоев исследовали по результатам измерений металлургической толщины пленок, выращенных на подложках КЭС - 0,01 и КДБ -  $10 \varnothing$  76 мм в следующем диапазоне варьирования исходных параметров: расход ПГС -  $50 \div 200$  л/мин; концентрация  $SiCl_4$  в смеси  $0,25 \div 2,5\%$  об; температура эпитаксии  $1150 \div 1310$  °C.



Характер зависимости скорости роста слоев от указанных параметров аналогичен зависимости, известной для других типов установок, в том числе УНЭС - 2ПВМ, однако абсолютные значения скорости роста на УНЭС - 2ПКА значительно ниже, чем на УНЭС - 2ПВМ (табл. 1).

Таблица 1

Сопоставление скоростей роста Si- слоев на разных установках.

T, °C	Конц., % об. SiCl <sub>4</sub>	Расход ПГС л/мин.	УНЭС-2ПКА		УНЭС-2ПВМ		$\frac{V_1}{V_2}$	$\frac{V_1 S_1}{V_2 S_2}$
			Линейная скорость ПГС, см/с	Скорость роста мкм/мин.	Синейная скорость ПГС, см/с	Скорость роста мкм/мин.		
1150	1,0	60	4,4	0,45	12,3	1,25	0,36	1,36
1250	1,0	60	4,4	0,38	12,3	1,4	0,27	1,03
1150	1,0	80	5,8	0,58	16,4	1,2	0,48	1,83
1250	1,0	80	5,8	0,53	16,4	1,9	0,28	1,06
1150	1,4	80	5,8	0,82	16,4	2,0	0,41	1,55
1250	1,4	80	5,8	0,95	16,4	2,35	0,4	1,53
1150	1,5	120	8,8	0,98	24,5	1,9	0,52	1,95
1250	1,5	120	8,8	1,18	24,5	2,9	0,4	1,53

Примечание: S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, площади поверхности пьедесталов установок УНЭС-2ПКА, и УНЭС-2ПВМ соответственно; V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, - скорости роста слоев на установках УНЭС-2ПКА и УНЭС-2ПВМ. При сопоставимых линейных скоростях ПГС в зоне осаждения, например, 8,5 см/сек, что соответствует расходу смеси 120 л/мин на УНЭС – 2ПКА и 40 л/мин на УНЭС – 2ПВМ скорости роста слоев примерно одинаковые (табл. 2).

Таблица 2

Сопоставление скоростей роста слоев на разных технологических установках при обеспечении одинаковых линейных скоростей ПГС в зоне осаждения.

C SiCl <sub>4</sub> , % об.	U лин., см/с	T, °C	Скорость роста, мкм/мин.	
			УНЭС-2ПКА V <sub>1</sub>	УНЭС-2ПКА V <sub>2</sub>
1,6	8,5	1150	1,05	1,0
1,6	8,5	1200	1,1	1,1
1,6	8,5	1250	1,18	1,2
1,8	8,5	1300	1,1	1,2

Указанное соотношение скоростей роста, а также более, слабая чувствительность скорости роста слоев на УНЭС - 2ПКА к температуре эпитаксии свидетельствуют о том, что процесс роста на УНЭС - 2ПКА при одинаковых объемных расходах смеси смещен в диффузионную область, где скорость роста лимитируется в большей степени массопереносом. Таким образом, малые скорости роста слоев на УНЭС - 2ПКА обусловлены уменьшением массопереноса реагентов к поверхности пьедестала, связанным с увеличением объема реактора и, в частности, с увеличением зазора между пьедесталом и стенкой реактора. Поэтому главными факторами повышения и управления скорости роста на УНЭС – 2ПКА являются стадии принудительного диффузионного переноса и концентрация SiCl<sub>4</sub> в смеси. Из табл. 1 видно, что коэффициент извлечения кремния из ПГС на установке УНЭС - 2ПКА в 1,5 раза выше, чем на УНЭС – 2ПВМ. Доля кремния, осаждаемого на подложках, составляет относительно всего извлекаемого, из ПГС кремния величину ~ 0,6 для обеих установок вне зависимости от диаметра подложек. Разброс толщины слоев по пластине и в партии структур ниже на УНЭС - 2ПКА по сравнению с УНЭС - 2ПВМ и для ряда режимов может быть стабилизирован на уровне ±5% и ±7% от среднего соответственно.

Для диапазона условий наращивания, обычно реализуемых на УНЭС – 2ПВМ, и установки УНЭС-2ПКА построены регрессионные модели скорости роста

$$V=1,93-0,373 \cdot 10^{-2} X_1-0,828 X_2-0,108 \cdot 10^{-2} X_3+1,9 \cdot 10^{-3} X_1 X_2+1,6 \cdot 10^{-6} X_1 X_3+7,58 \cdot 10^{-4} X_2 X_3; \quad (9)$$

Данные модели описывают эксперимент с точностью не хуже ± 6 и ±2% соответственно в пределах следующего варьирования параметров; расход ПГС (X<sub>1</sub>) - 60÷120 л/мин; концентрация SiCl<sub>4</sub> в смеси (X<sub>2</sub>) - 1,37±2,28% од; температура эпитаксии (X<sub>3</sub>) - 1210÷1310 °C.

Модели (8,9) могут использоваться для прогнозирования скорости роста или выбора режимов наращивания слоев, обеспечивающих скорость роста в диапазоне 0,7+1,2 мкм/мин.

Кинетика роста толстых опорных слоев поликристаллического кремния в хлоридном процессе, реализованном на УНЭС – 2ПКА, с точностью + 15% описывается моделью

$$V = -1,077 - 1,583 \cdot 10^{-7} X_1 X_2 X_3 - 2,242 \cdot 10^{-6} X_3 + 3,972 \cdot 10^{-2} X_2 + 5,373 \cdot 10^{-4} X_3, (10)$$

где  $X_1$  - температура осаждения 1240÷1300 °С;  $X_2$  - расход водорода через испаритель, находящийся при температуре 20 °С, 60 ÷100 л/мин;  $X_3$  - расход водорода в основной линии 20 ÷60 л/мин.

Модель (10) охватывает диапазон концентраций  $\text{SiCl}_4$  в ПГС от 2 до 12% об и позволяет прогнозировать среднюю скорость роста слоев в партии от 1 до 3,2 мкм/мин. Максимальная скорость роста (рис. 3) наблюдается при концентрации  $\text{SiCl}_4$  в ПГС ~5% об, максимальном, из испытанных, расходе ПГС и температуре 1270°С. Толщина слоев уменьшается по ходу потока смеси, причем максимальная неоднородность толщины слоев в партии наблюдается в процессах, режим которых соответствует максимальной скорости роста слоев.

Одним из факторов, понижающих скорость роста слоев на УНЭС – 2ПКА, а также увеличивающих разброс параметров слоев между партиями и вызывающих повышенный уровень брака по качеству поверхности, является избыточное давление в реакторе, увеличивающееся при повышении расхода ПГС от  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/сек до  $3 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/сек на 20 кПа при давлении в помещении  $P_0 = 98,1$  кПа (рис. 3). Этот фактор необходимо учитывать при эксплуатации установок УНЭС - 2КА, рассматривая его в качестве одного из основных независимых параметров процесса.

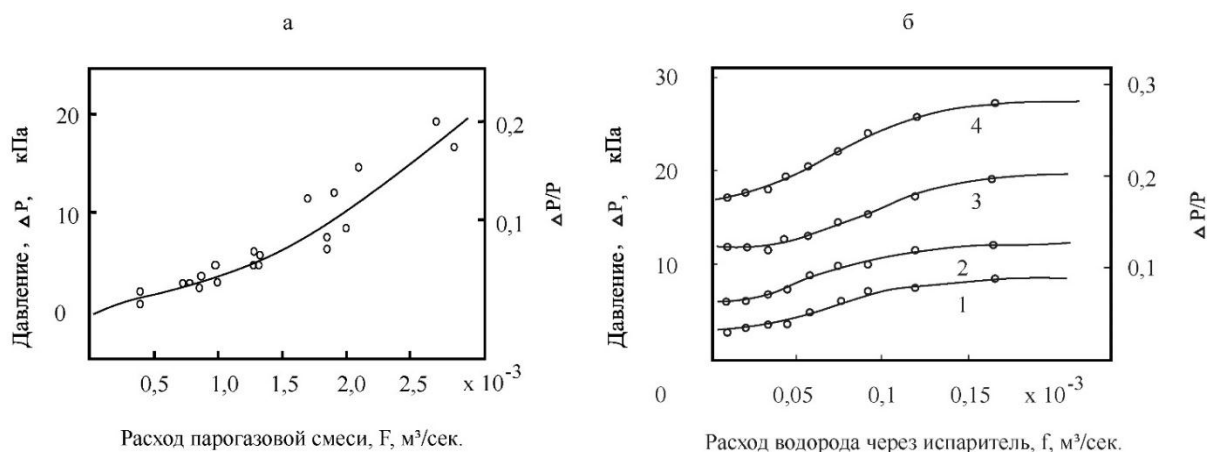


Рис. 3. Влияние расхода  $\text{H}_2$  и ПГС на избыточное давление в реакторе (а) и испарителе (б) при разбавляющем потоке  $\text{H}_2$ : 1 – 0,75, 2 - 1,3; 4 - 2,83 м<sup>3</sup>/с x 10<sup>3</sup>; давление в помещении - 98,1 кПа.

Важным фактором, влияющим на качество поверхности КОЭС, является температура стенок реактора, контактирующих с ПГС. Высокая теплопроводность водохлаждаемых металлических стенок реактора УНЭС - 2ПКА приводит к снижению температуры ПГС у поверхности стенок и соответственно к повышению вероятности образования в ПГС полихлоридов, служащих источником дефектообразования в процессе роста КОЭС. Отсюда получение КОЭС в одинаковых условиях, (включая чистоту исходного  $\text{H}_2$ ) сопровождается на УНЭС – 2ПКА повышенным уровнем брака по качеству поверхности в сравнении с продукцией, изготавливаемой на УНЭС – 2ПВМ. Эксперименты с введением теплового экрана в реактор УНЭС - 2ПКА однозначно подтверждают изложенное. Качество структур и выход годных повышаются, увеличивается на 20÷30% скорость роста слоев. Полученные результаты определяют пути совершенствования конструкции реакторного узла установок УНЭС - 2ПКА (включая наряду с применением кварцевых или графитовых тепловых экранов) при использовании серийных реакторов, разработку реакторов с регулируемым теплоотводом от стенок, в которых могут быть созданы условия, снижающие образование полихлоридов в зоне осаждения.

Полученные результаты представляют ценность еще и потому, что могут быть применены при получении  $n\text{-p}^+$  или  $p\text{-p}^+$  структур для солнечных элементов на сильнолегированных  $p^+$  или  $p^+$  подложках из мультикремния типа вторичного литого поликремния [12,13] для изготовления которого применяют отходы производства кремния электронного качества, а осаждение пленок ведут с применением технологий [14], очень близких по сути к обратным [5], внедрение которых в



производство кремния- сырца привело в начале XXI века к десятикратному падению цен на этот материал и, соответственно, к снижению стоимости единицы фотоэлектрической мощности до уровня 0,5\$ США и ниже.

## ЛИТЕРАТУРА

1. K.L. Lyutovich, J.T. Abdurakhmanov, L.L.Lukashevich, I.V. Drachuk, Uzbek Journal of Physics, No 5-6, P.31 (1997).
2. J.T. Abdurakhmanov, I.V.Drachuk, K.L. Lyutovich, Uzbek Journal of Physics, No 5-6, P.74 (1997).
3. Наумов А.В., Плеханов С.И. IX международная конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе «Кремний-2012». Иркутск, 2012 - С. 12
4. В.В. Харченко. Вопросы эпитаксиального осаждения кремния. Ташкент, 1976, с.14-18
5. Наумов А.В., Плеханов С.И.// Цветная металлургия, 2013, №6, с.70-74.
6. Наумов А.В. Рынок поликристаллического кремния: состояние и перспективы. Электроника, №9, 2015 с. 1-8.
7. Sh.K. Kuchkanov, Kh.B. Ashurov. Tech. Phys. Lett. 44, No. 4, P,334 (2018).
8. Kh.B. Ashurov, B.M. Abdurakhmanov, Sh.K. Kuchkanov, S.J.Nigmatov, S.E.Maksimov. Uzbek Journal of Physics Vol.15 (№ 1-2). 2013. PP.83-87.
9. Amron J., Electrochem. Tech., №2, С.327, (1964).
10. Абдурахманов Б.М., Бойко С.Р., Кузнецов С.Р., Кустов И.Ф., Саидов М.С., и др. “Информационное сообщение. №304 Издательство “ФАН”, Ташкент. -1983, С-25
11. Абдурахманов Б.М., Харченко В.В., Пашкуденко В.П. Прибор для определения содержания тетрахлорида кремния в водороде. Авторское свидетельство. СССР №387263.
12. Абдурахманов Б.М., Ашуров Х.Б., Курбонов М.Ш. Химико-металлургический передел кремнезема в моносилановое сырье для солнечной энергетики и наноэлектроники., Ташкент- 2018, Из-во «Navroz», С-505
13. Абдурахманов Б.М., Ашуров М.Х., Ашуров Х.Б., Кадыров А.Л., Курбонов М.Ш., Оксенгендлер Б.Л. Проблемы и перспективы кремниевого производства в Центральной Азии, Из-во «Нури марърифат», Худжанд, 2016, С- 420.
14. Абдурахманов Б.М., Устройство для газовой эпитаксии. Авторское свидетельство СССР № 1111513

## REFERENCES

1. K.L. Lyutovich, J.T. Abdurakhmanov, L.L.Lukashevich, I.V. Drachuk, Uzbek Journal of Physics, No 5-6, P.31 (1997).
2. J.T. Abdurakhmanov, I.V.Drachuk, K.L. Lyutovich, Uzbek Journal of Physics, No 5-6, P.74 (1997).
3. Naumov A.V., Plekhanov S.I. IX international conference on topical issues of physics, materials science, technology and diagnostics of silicon, nanoscale structures and devices based on it "Silicon-2012". Irkutsk, 2012 - P. 12
4. V.V. Kharchenko. Issues of epitaxial silicon deposition. Tashkent, 1976,PP.14-18
5. Naumov A.V., Plekhanov S.I.// Non-ferrous metallurgy, 2013, No. 6, PP.70-74.
6. Naumov A.V. Polycrystalline silicon market: state and prospects. Electronics, No. 9, 2015 PP. 1-8.
7. Sh.K. Kuchkanov, Kh.B. Ashurov. Tech. Phys. Lett. 44., №4, PP.334 (2018).
8. Kh.B. Ashurov, B.M. Abdurakhmanov, Sh.K. Kuchkanov, S.J. Nigmatov, S.E. Maksimov. Uzbek Journal of Physics Vol.15 (No. 1-2). 2013. PP.83-87.
9. Amron J., Electrochem. Tech. №2, PP.327 (1964).
10. Abdurakhmanov B.M., Boyko S.R., Kuznetsov S.R., Kustov I.F., Saidov M.S., et al. “Information message. No. 304 Publishing house “FAN”, Tashkent. -1983, P.25
11. Abdurakhmanov B.M., Kharchenko V.V., Pashkudenko V.P. Device for determining the content of silicon tetrachloride in hydrogen. Copyright certificate. USSR No. 387263.
12. Abdurakhmanov B.M., Ashurov Kh.B., Kurbonov M.Sh. Chemical and metallurgical conversion of silica into monosilane raw materials for solar energy and nanoelectronics., Tashkent - 2018, Navroz, P.505.
13. Abdurakhmanov B.M., Ashurov M.Kh., Ashurov Kh.B., Kadyrov A.L., Kurbonov M.Sh., Oksengendler B.L. Problems and Prospects of Silicon Production in Central Asia, Nuri Mararifat Publishing House, Khujand, 2016, P.420.
14. Abdurakhmanov BM, Device for gas epitaxy. Author's certificate of the USSR No. 1111513