

М358452
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ПИСАРЕВСКИЙ Константин Евгеньевич

ТЕПЛОМАССООБМЕН ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ И СМЕШАННОЙ
КОНВЕКЦИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КРУГЛОМ РЕАКТОРЕ
С ПЛАСТИНАМИ

Специальность 05.14.05 -
Теоретические основы теплотехники

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ПИСАРЕВСКИЙ Константин Евгеньевич

ТЕПЛОМАССООБМЕН ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ И СМЕШАННОЙ
КОНВЕКЦИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КРУГЛОМ РЕАКТОРЕ
С ПЛАСТИНАМИ

Специальность 05.14.05 -
Теоретические основы теплотехники

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана

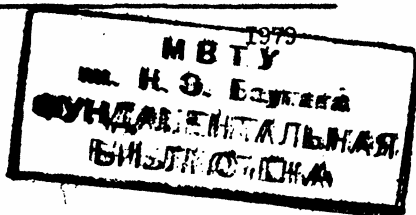


1358452

Писаревский К.Е. Теплообмен

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва



Работа выполнена на кафедре термодинамики и теплопередачи
Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшего технического училища им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Г.Б.ПЕТРАЖИЦКИЙ

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Г.Б.СИНЯРЕВ,

кандидат технических наук Б.П.ЗАХАРОВ

Ведущее предприятие:

Институт Высоких Температур АН СССР

Автореферат разослан ".....".....19... г.

Защита состоится ".....".....19... г.
в..... час..... мин на заседании специализированного Совета
К.053.15.05 "Тепловые машины и теоретические основы теплотехники"
Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшего технического училища им. Н.Э.Баумана по адресу:

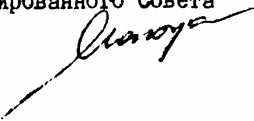
107005, Москва, Б-5, Лефортовская набережная, д. I, корпус
"Энергомашиностроение".

Ваши отзывы в 2-ух экз., заверенные печатью, просьба высылать
по адресу:

107005, Москва, 2-ая Бауманская ул., дом 5, МВТУ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ.

Ученый секретарь специализированного Совета
доктор технических наук

 МАНУШИН Э.А.

Актуальность проблемы. Основой производства многих полупроводниковых приборов являются технологические процессы диффузии и окисления, которые проводятся в горизонтальном реакторе, представляющем из себя круглую кварцевую трубу, расположенную в нагревательной камере электропечи. В реакторе помещаются обрабатываемые кремниевые пластины и туда подается регулируемый поток парогазовой смеси. В результате этого происходит легирование пластин. От процессов тепломассообмена в газовой фазе реактора зависит степень неравномерности легирования пластин и, следовательно, качество получаемых полупроводниковых приборов.

Разработка оборудования для новых, более интенсивных режимов проведения технологических процессов требует знания существа физических явлений, происходящих в газовой фазе реактора и создания физически обоснованных методик выбора параметров проектируемого оборудования.

Чаще всего пластины располагаются перпендикулярно потоку. Однако в настоящее время отсутствуют методы расчета газозафазных процессов в горизонтальном реакторе с пластинами, расположенными перпендикулярно потоку, и нет представления о физической сути явлений, происходящих в газовой фазе.

Цель работы. Создание методики расчета газозафазных процессов в горизонтальном реакторе с перпендикулярными потоку пластинами. Исследование закономерностей течения, тепло- и массообмена в реакторе. Разработка методики определения оптимальных параметров проведения технологических процессов диффузии - окисления. Получение зависимостей необходимых для физически обоснованного выбора параметров вновь проектируемого оборудования.

Методы исследования. Теоретическое исследование основано на численном анализе процессов течения и тепломассообмена путем решения полной системы трехмерных уравнений гидродинамики, энергии и диффузии вязкого несжимаемого теплопроводного газа методом сеток на ЭВМ.

В экспериментальном исследовании основное внимание уделено подтверждению теоретически полученных зависимостей теплообмена.

Научная новизна. Разработана математическая модель трехмерной задачи течения, тепло- и массообмена в горизонтальном круглом реакторе с пластинами и алгоритм ее решения. Установлено наличие трех форм течения в "ячейке" и определены границы их существования в зависимости от значений основных параметров. Создана и

обоснована упрощенная аналитическая методика расчета поля скоростей для режимов, встречающихся в практике проведения технологических процессов.

Теоретически доказана изотермичность кремниевых пластин.

Впервые исследованы закономерности течения, тепло- и массообмена в горизонтальной круглой трубе с пластинами, перпендикулярными потоку, при небольших числах Рейнольдса и Грасгофа ($Re < 50$, $Gr < 10^4$).

Обнаружено влияние на течение и тепломассообмен свободной конвекции в продольном осевом сечении, ведущее к значительному изменению по угловой координате осевой скорости, температуры и концентрации и зависящее от отношения числа Грасгофа к кубу числа Рейнольдса.

Создана методика подбора основных параметров технологического процесса.

Практическая ценность. Установленные закономерности и разработанные методики дают возможность, используя созданный пакет прикладных программ:

- выбрать оптимальные параметры проведения технологических процессов;
- обосновано выставлять требования на новое технологическое оборудование при проектировании новых производственных комплексов.

Апробация работы. Основные разделы диссертации докладывались и обсуждались:

- на научном семинаре кафедры "Термодинамика и теплопередача" МВТУ им. Баумана в 1979 г.;
- на Межвузовском семинаре "Проблемы теплопередачи", Москва, 1976 г.;
- на Всесоюзной научно-технической конференции "Теплообмен и моделирование в энергетических установках", Тула, 1979 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 статьи, сделано 2 доклада на Всесоюзных научно-технических конференциях, зарегистрировано в Государственном Фонде Алгоритмов и Программ 5 программ.

Объем работы. Работа состоит из 5 глав, выводов и приложения, содержит 140 страниц машинописного текста, 90 рисунков и 24 таблицы. Список литературы содержит 50 наименований советских и зарубежных авторов.

В I главе на основании обзора литературы сформулирована поста-

новка задачи исследования.

Первые работы, посвященные изучению гидродинамики и тепломассообмена в технологических процессах получения полупроводниковых материалов появились лишь в 70-х годах в связи с развитием новых методов теории тепломассообмена. В настоящее время теоретический подход к решению технологических задач только начинает развиваться и находится в стадии становления.

Систематическое изучение физических процессов, происходящих в газовой фазе, проточного реактора с расположенными в нем перпендикулярно потоку пластинами, ранее не проводилось. Это объясняется пространственным характером движения газа, т.к. оно является сложной комбинацией двух течений – свободной конвекции в поперечном круговом сечении трубы и вынужденного обтекания ряда препятствий в продольном (осевом) направлении.

Однако, если рассматривать эти течения (смешанная конвекция в горизонтальной трубе и вынужденное обтекание препятствий в условиях внутренней задачи) независимо друг от друга, то каждое достаточно изучено к настоящему времени само по себе. Знание их закономерностей во многом помогает понять и исследовать сложное результирующее движение, составляющими которого они являются.

Анализ литературных данных позволяет обосновать следующую постановку задачи.

Применяя теорию развитого периодического течения и теплообмена в каналах с периодическим изменением площади поперечного сечения, предложенную Патанкар, Лью и Спэрроу, исследование можно свести к элементарной "ячейке". "Ячейка" образована участком трубы, ограниченными поперечными сечениями, проходящими через две рядом расположенные пластины. В области полностью развитого течения распределения всех параметров процесса одинаковы или подобны в сходственных точках каждой "ячейки". Поэтому можно исследовать процессы, происходящие только в одной "ячейке".

Исходным моментом теоретических исследований смешанноконвективного течения вязкого несжимаемого газа в горизонтальной пустой трубе, является полная система уравнений конвективного теплообмена в приближении Буссинеска. Эта система решается как аналитически (Мортон, Мартиненко и колпачиков и др.), так и численно (Ньюэлл и Берглес). Поскольку обтекание пластин в продольном направлении реактора будет вихревым, что следует из работ Ухова и Сидельникова, Вольфштейна и Сполдинга, Симуни и др., то ее анали-

тическое решение невозможно. В настоящее время единственным способом ее решения может быть численный метод конечных разностей. Однако конечно-разностные методы решения пространственных задач гидродинамики и тепломассообмена только начинают разрабатываться, что требует критического подхода к предлагаемым разностным схемам.

В результате обзора всех доступных (и очень немногочисленных) до 1978 года работ по численному решению трехмерных задач гидродинамики сделан вывод, что при выборе разностной схемы для решения трехмерных уравнений Навье-Стокса необходимо обращать особое внимание на выполнение уравнения неразрывности на разностном решении. На этом основании, видимо, следует воздерживаться от применения схем, где это условие не встречается в явном виде.

В главе II представлена математическая модель задачи о тепломассообмене в "ячейке" горизонтального круглого реактора с пластинами перпендикулярными потоку.

Исследование движения среды и тепломассообмена в "ячейке" проводится на основе численного решения следующей системы уравнений, включающей уравнение движения в форме Гельмгольца, уравнение неразрывности, уравнения энергии и диффузии:

$$\vec{V} \nabla \vec{\omega} - \vec{\omega} \nabla \vec{V} = \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{\omega} - \frac{Gr}{Re^2} [\nabla \times (\theta \hat{g})] \quad (Ia)$$

$$\nabla^2 \vec{V} = -\nabla \times \vec{\omega} \quad (Iб)$$

$$\nabla \vec{V} = 0 \quad (Iв)$$

$$\vec{V} \nabla \theta = (1/Pe) \nabla^2 \theta \quad (Iг)$$

$$\vec{V} \nabla c = (1/[Re \cdot Sc]) \nabla^2 c \quad (Id)$$

$\vec{V}$ - безразмерная скорость, $\vec{\omega}$ - вихрь скорости, $\hat{g}$ - единичный вектор ускорения свободного падения, $\theta = (T - T_0)R / (q_{cr} \cdot l)$ - безразмерная температура, где T_0 - температура в центре пластины на входе в "ячейку", R - радиус трубы, q_{cr} - плотность теплового потока со стенки трубы. Поскольку течение развитое, то профили температур в двух соседних "ячейках" одинаковы и сдвинуты один относительно другого на какую-то величину.

Поэтому температурное поле в "ячейке" разделяется на две части

линейную и периодическую: $\theta = \bar{\theta} + (2/Pe) \cdot z$ (2)

Функция $\bar{\theta}$ периодична, так что $\bar{\theta}|_{z=L} = \bar{\theta}|_{z=L+L} = \bar{\theta}|_{z=2L} = \dots$.
 L - размерная длина "ячейки" (расстояние между пластинами).
 $Re = G_0 / (\pi R \rho \cdot v)$ - число Рейнольдса, $Sc = \nu / D$ - число Шмидта, $Gr = g \beta q_{ct} R^4 / (\nu^2 \lambda)$ - число Грасгофа. D - коэффициент диффузии газа-диффузанта в газе-носителе, ν - кинематический коэффициент вязкости, G_0 - расход газовой смеси на входе в реактор, ρ - плотность газовой смеси, $Pe = Re \cdot Pr$ - число Пекле, Pr - число Прандтля, β - коэффициент объемного расширения, λ - коэффициент теплопроводности, g - ускорение свободного падения.
 C - безразмерная концентрация (за масштаб принята концентрация в верхней точке на поверхности трубы на входе в "ячейку").

В силу симметрии задачи относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось трубы, рассматривается лишь половина "ячейки". На стенке трубы задается постоянная плотность теплового потока $q_{ct} = \text{const}$ и условия отсутствия на нее потоков осаждаемой массы. Считается, что на поверхности пластин идут реакции I порядка и поток осаждаемой массы прямо пропорционален концентрации:

$$-\nabla C = (\kappa R/D) \cdot C \quad (3)$$

Здесь κ - константа скорости химической реакции на пластине.

Сами пластины считаются бесконечно тонкими и теплопроводными.

Принимая во внимание все вышесказанное, система граничных условий, замыкающая систему дифференциальных уравнений (I) записывается в следующем виде:

на пластине: $\bar{V} = 0$; $\bar{\omega} = \nabla \times \bar{V}$; $-\nabla C = (\kappa R/D) \cdot C$;

$$\frac{\lambda_n \delta}{\lambda_r R} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \Big|_+ - \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \Big|_- = 0$$

на стенке трубы:

$$\bar{V} = 0; \bar{\omega} = \nabla \times \bar{V}; \partial \bar{\theta} / \partial r = 1; \nabla C = 0 \quad (4)$$

на входе (выходе):

$$f|_{z=0} = f|_{z=L}; (\partial f / \partial z)|_{z=0} = (\partial f / \partial z)|_{z=L}$$

f это $\bar{V}, \bar{\omega}, \bar{\theta}, C$

Здесь λ_n и λ_r - коэффициенты теплопроводности пластины и газа соответственно, δ - толщина пластины. $C^* = C/C_{ct}$, где C_{ct} - безразмерная концентрация на стенке в данном сечении.

Система стационарных дифференциальных уравнений (I) и граничных условий (4), расписанная в проекции на оси цилиндрической системы координат, решается методом конечных разностей по явной разностной схеме типа Гаусса-Зейделя. Производные I порядка аппроксимируются обычными центральными разностями, II порядка — на трехточечном шаблоне. При этом используется консервативная форма записи разностных уравнений. Производные на твердых границах аппроксимируются односторонними трехточечными разностями.

Алгоритм решения разностной системы уравнений заключается в следующем. Если после n -ой итерации известны значения всех функций во всех точках разностной сетки $\{\bar{\omega}_{ijk}\}, \{\bar{V}_{ijk}\}, \{\bar{\theta}_{ijk}\}$, то с помощью разностных аналогов уравнений (Ia)–(Iг) в каждой внутренней точке пространственной области последовательно находятся значения $\bar{\omega}_{ijk}, \bar{V}_{ijk}, \bar{\theta}_{ijk}$ в $(n+1)$ -ой итерации. Затем с помощью систем разностных граничных условий определяются значения функций в граничных точках в $(n+1)$ -ой итерации. По уравнению неразрывности (Iб) подправляются значения радиальной составляющей скорости на радиусах оголо пластин, а на входе и выходе производится подправление значений осевой составляющей скорости, чтобы выполнялось условие постоянства расхода.

Далее вышеописанная процедура повторяется для следующей итерации. Затем по найденному стационарному полю скоростей и соответствующим граничным условиям таким же итеративным методом решается уравнение (Iд) и находится поле концентраций.

Создан пакет программ на алгоритмическом языке ФОРТРАН для решения поставленной трехмерной задачи течения и тепло-массообмена в "ячейке". В него кроме основных программ расчета полей скорости, температур и концентраций входят следующие программы обработки результатов численного решения:

- программа вычисления локальных и интегральных параметров теплообмена и массообмена;
- программа построения машинным путем изоклин скоростей, изотерм и линий постоянных концентраций в характерных сечениях;
- программа построения траекторий движения частиц газа.

Кроме того создан и зарегистрирован в Государственном Фонде Алгоритмов и программ пакет программ для решения осесимметричной задачи течения, тепло- и массообмена в "ячейке" горизонтального реактора с пластинами.

Приведено численное доказательство аппроксимации предложенной

разностной схемой исходной системы уравнений на решении.

В качестве модельных задач для проверки алгоритма и программы были выбраны задачи течения и теплообмена в пустой трубе при температурных граничных условиях на стенке трубы как I так и II рода. Отличие известных точных аналитических решений от численных не превышало 1%.

Кроме того, была запрограммирована осесимметричная задача течения в переменных $\psi - \omega$ (функция тока - вихрь). Ее решение сравнивалось с решением осесимметричной задачи по основной программе. Совпадение картин течения очень хорошее.

На основании методических расчетов выбраны оптимальные параметры разностной сетки и схемы.

В III главе рассмотрены течение и тепломассообмен при вынужденном течении (осесимметричная задача).

Расчеты свидетельствуют о существовании в "ячейке" трех форм течения.

I форма характерна безвихревым обтеканием пластин.

Признаком II формы течения является наличие во всем пространстве между пластинами вихревых зон (как за пластиной, так иногда и перед ней) и зоны основного течения.

III форма течения характеризуется наличием застойной зоны в пространстве между пластинами, где образуется один или несколько парных вихрей малой интенсивности.

Существование той или иной формы течения определяется значениями трех параметров:

- безразмерного радиуса пластины r_1 ;
- безразмерной длины "ячейки" (расстояние между пластинами) l ;
- числа Рейнольдса Re .

Был исследован весь встречающийся в практике диапазон изменения этих параметров:

$$0,25 \leq r_1 \leq 0,75; \quad 0,067 \leq l \leq 3; \quad 0,1 \leq Re \leq 30.$$

Определено примерное положение границ областей существования форм течения. Показано, что существует область значений l ($l \leq 0,5$) где возможно существование только III формы течения, независимо от значений Re и r_1 .

В практике проведения технологических процессов расстояние между пластинами $l < 0,5$ почти всегда, и поэтому там реализуется III форма течения.

В этом случае для решения задач тепло- и массообмена разработана упрощенная модель течения, при которой в "ячейке" выделяются 2 зоны:

- застойная зона (при $r \leq r_1$), где все скорости равны нулю, и
- зона кольцевого течения ($r > r_1$), где существует лишь осевая составляющая скорости:

$$w = \frac{2}{1-r_1^2} \frac{(1-r^2)\ln r_1 - (1-r_1^2)\ln r}{1-r_1^2 + (1+r_1^2)\ln r_1} \quad (6)$$

Доказано, что локальные плотности потоков тепла и массы по радиусу пластины при расчете тепло- и массообмена с использованием поля скоростей, вычисленного по упрощенной модели, отличаются не более чем на 2% от их значений, полученных с использованием полной системы уравнений гидродинамики.

Таким образом задача расчета тепло- и массообмена при Ш форме течения значительно упрощается, т.к., задаваясь исходным профилем скорости, вычисленным по упрощенной модели (6), необходимо решать только уравнение переноса тепла (или уравнение диффузии), не решая уравнений гидродинамики.

Изучено влияние основных параметров процесса на теплообмен в "ячейке" при граничных условиях I и II рода на стенке трубы.

Самым важным при исследовании теплообмена является распределение температуры по пластине, т.к. от этого зависит скорость химических реакций и коэффициент диффузии в твердом теле. Это распределение в первую очередь зависит от значения симплекса $\lambda_n \delta / (\lambda_r R)$. Показано, что в диапазоне практических значений этого симплекса ($0.333 \leq \lambda_n \delta / (\lambda_r R) \leq 5$) неравномерность распределения температуры по пластине не превышает 6-8%.

В качестве основных характеристик массообмена в "ячейке" выявлены и предложены следующие:

- локальная плотность потока массы, осаждаемой на пластину - $j_n = -(\rho D c_{cr} / R) \cdot \partial c / \partial z$;
- относительная неравномерность распределения потоков осаждаемой массы по радиусу пластины - $\delta = j_{r=r_1} / j_{r=0}$;
- радиус N % неравномерности распределения осаждаемой массы по пластине - $r_{N\%}$;
- неравномерность легирования пластин в партии - δ' и связанный с ней коэффициент обеднения смеси в "ячейке" - $\alpha = j^{(n+1)} / j^{(n)}$ где $j^{(n)}$ - полный поток массы на входе в n-ую "ячейку",

j_{max} - полный поток массы на входе в $(n+1)$ -ую "ячейку" (на выходе из n -ой "ячейки").

Исследовано влияние основных параметров процесса - ℓ , ν_1 , Re , Sc и $\kappa R/D$ на характеристики массообмена при вынужденном течении. Полученные в результате проведенных параметрических расчетов массообмена значения основных характеристик помещены в одну сводную таблицу. Построены графики основных зависимостей $\alpha = f(Re, Sc, \ell, \nu_1, \kappa R/D)$ и $\delta = f(\ell, \kappa R/D, \nu_1)$. Наиболее важными для практических приложений являются следующие выводы:

1. Решающее влияние на неравномерность распределения потока осаждаемой массы по радиусу пластины оказывает комплекс $\kappa R/D$.
2. При Ш форме течения безразмерные плотности потоков массы на пластину, а следовательно δ и $\nu_N\%$ не зависят от числа Рейнольдса (расхода смеси).
3. $\nu_N\%$ практически не зависит от радиуса пластины ν_1 .
4. При Ш форме течения распределения безразмерных плотностей потоков массы по лицевой и тыльной сторонам пластины очень мало отличаются друг от друга.

На основании полученных зависимостей предложена методика выбора оптимальных параметров технологического процесса по заданным δ и δ' , заключающаяся в следующем. По выбранному количеству пластин в партии N определяется α из формулы:

$$\alpha = \sqrt[N]{1 - \delta'} \quad (7)$$

По зависимостям $\alpha = f(\nu_1, \ell, Re)$ при заданном $\kappa R/D$ подбирается область значений Re, ν_1, ℓ в которой реализуется это α . Т.к. $\nu_N\%$ не зависит от Re , то в данной области подбираются такие ℓ и ν_1 по зависимостям $\nu_N\% = f(\ell)$, чтобы ν_1 было равно $\nu_{N\%}$, причем это ν_1 было, по возможности максимальным. После этого, для подобранных таким образом параметров $\nu_1, Re, Sc, \ell, \kappa R/D$, можно провести проверочный расчет, используя имеющийся пакет прикладных программ.

В IV главе исследуется влияние свободной конвекции на течение и тепломассообмен в "ячейке". Созданная программа решения трехмерной задачи позволяет вести счет на сетке $19 \times 19 \times 11$, которая, как показано, дает количественные результаты с приемлемой точностью для Ш формы течения, наиболее важной с точки зрения практических приложений.

Анализ процессов течения, тепло- и массообмена, проведенный на основе численных экспериментов, показал следующее:

1. Границы существования III формы течения остаются теми же что и при вынужденном течении.

2. Влияние свободной конвекции в круговом поперечном сечении на течение и теплообмен, характеризуемое отношением Gr/Re^2 , в исследованном диапазоне небольших чисел Грасгофа ($Gr \leq 10^4$), встречающихся на практике, незначительно.

3. Влияние свободной конвекции при малых числах Рейнольдса ($Re < 50$) проявляется в первую очередь в расслоении по угловой координате осевой составляющей скорости w в кольцевой области. Это расслоение обусловлено существованием радиальной составляющей вихря ω_r :

$$\omega_r = \partial w / r \partial \varphi - \partial v / \partial z \quad (8)$$

ω_r появляется за счет момента подъемных архимедовых сил по длине трубы в продольных плоскостях и зависит, как следует из формулы, выражающей проекцию уравнения движения (1а) на ось r , от значения комплексов Gr/Re^2 и $(Gr/Re^2) \cdot (2/Pe) = (Gr/Re^2) \cdot (2/P_r)$.

В исследованном диапазоне изменения параметров ($Gr \leq 10^4$, $Re < 50$), когда влияние свободной конвекции в круговом поперечном сечении, определяемое отношением Gr/Re^2 , незначительно, предложено следующее разделение режимов течения в зависимости от значения отношения Gr/Re^2 :

- | | |
|-------------------------|--|
| $Gr/Re^2 < 0,1$ | - режим вынужденного течения; |
| $0,1 \leq Gr/Re^2 < 10$ | - режим смешанноконвективного течения; |
| $10 \leq Gr/Re^2$ | - режим свободной конвекции. |

4. Влияние свободной конвекции на теплообмен и массообмен проявляется в расслоении температуры и концентрации по угловой координате φ . Их распределения по углу близки к синусоиде.

Расслоение температуры и концентраций в кольцевой области вызвано расслоением по углу осевой составляющей скорости. В застойной зоне между пластинами основным механизмом распространения тепла и массы является диффузия.

5. Пластины и в условиях смешанной конвекции остаются практически изотермичными.

6. Идентичность параметров массообмена на левой и правой пластинах при наличии III формы течения сохраняется и в условиях смешанной конвекции.

7. При смешанной конвекции неравномерность распределения ло-

кальшой плотности потока массы по радиусу r становится функцией угла φ , и максимальное δ , достигаемое в нижней точке пластины, больше, чем при вынужденном течении. Свободная конвекция, увеличивая неравномерность распределения локальной плотности потока массы, осаждаемой на пластине, является нежелательным явлением. Предложены пути уменьшения ее влияния, заключающиеся в уменьшении значения комплекса $\kappa R/D$ или увеличении числа Рейнольдса (уменьшении отношения Gr/Re^3).

8. Показано, что неравномерность легирования пластин в партии δ , и связанный с ней коэффициент обеднения смеси α не зависят от числа Грасгофа, т.е. свободная конвекция на δ и α не влияет.

В главе проведено экспериментальное исследование теплообмена в горизонтальном реакторе с кремниевыми пластинами, установленными перпендикулярно потоку, с целью подтверждения результатов численных расчетов и доказательства правильности допущений, положенных в основу математической модели.

Основой рабочей части экспериментальной установки является круглая кварцевая труба диаметром 60 мм, через ротаметр соединенная с магистралью подачи сжатого воздуха. Система нагрева и регулирования включает в себя источник регулируемой мощности постоянного тока на 2 канала регулирования, основной нагреватель и двухзонный охранный нагреватель.

В качестве термодатчиков впервые применены планарные транзисторы марки КТ307В. Как термодатчики они характеризуются доступностью и дешевизной (10 коп/шт), высокой чувствительностью (1,5 мВ/К) и стабильностью ($10^{-3}\%$) и очень малыми габаритами (0,8x0,8x0,4 мм). Разработана конструкция термодатчика, позволявшая измерить температуру поверхности стекла в точке. Проведенная метрологическая аттестация транзисторных термодатчиков подтвердила их высокую работоспособность.

Абсолютная погрешность измерения температуры составляла 0,3 К. Относительная погрешность измерения расхода составляла 3,5%, а относительная погрешность измерения плотности теплового потока - 12,4%.

В экспериментах четко подтверждаются все качественные закономерности, выявленные в расчетах, а именно:

1. Линейное изменение температуры стенки трубы и на оси пластины по длине трубы. Наклон прямой $T = f(z)$ пропорционален числу Пекле. Прямые, отражающие изменение температуры стенки

и температуры на оси пластин по длине труб, эквидистантно.

2. Расслоение температуры стенки по углу. При этом распределение температуры стенки при $Gz/Re^3 = 0,14$ хорошо ложится на синусоиду.

3. Равномерность распределения температуры по пластине. Наибольшая разница температур между различными точками пластины составляет 0,5 градуса, что меньше предельной абсолютной погрешности измерения разности температур, равной 0,6 градусов.

4. Практическое отсутствие влияния расстояния между пластинами на теплообмен. Разброс температур для расстояний между пластинами 5 и 15 мм лежит в пределах погрешности измерения температур. Результаты непосредственного сравнения экспериментальных и расчетных данных для одного из опытов показывают, что максимальное отличие расчетной температуры стенки от определенной в эксперименте составляет 18%.

Если принять во внимание, что погрешность определения плотности теплового потока со стенки трубы составляет около 12,5%, погрешность измерения расхода 3,5%, а сетка $19 \times 19 \times 11$, на которой проводился численный счет, тоже вносит некоторую погрешность, то совпадение данных расчета и эксперимента следует считать удовлетворительным.

ВЫВОДЫ

1. Впервые предпринято систематическое изучение течения и тепломассообмена в газовой фазе при технологических процессах диффузии и окисления для получения полупроводниковых материалов в прямоточном горизонтальном реакторе с пластинами, расположенными перпендикулярно потоку.

2. Создана математическая модель трехмерной задачи тепломассообмена в "ячейке" горизонтального реактора с пластинами, перпендикулярными потоку. Полная система трехмерных уравнений гидродинамики вязкого несжимаемого газа, уравнение переноса тепла, уравнение диффузии замыкаются при помощи поставленных специально для данной задачи краевых условий. Для численного решения на основе метода конечных разностей, разработан новый алгоритм решения, отличный от ранее применявшихся. Правильность алгоритма и программ проверена численными экспериментами и на модельных задачах.

3. Созданы пакеты программ на алгоритмическом языке ФОРТРАН для решения как трехмерной, так и осесимметричной задачи течения, тепло- и массообмена в "ячейке" горизонтального круглого реакто-

ра с пластинами. Пакет программ зарегистрирован в Государственном Фонде Алгоритмов и Программ. Он позволяет получать в табличном и графическом виде все необходимые локальные и интегральные параметры тепло- и массообмена для заданных исходных параметров процесса.

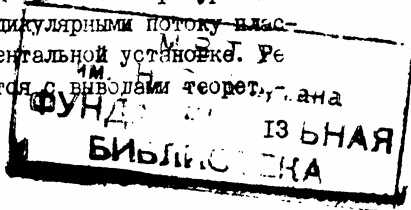
4. Проведено численное исследование осесимметричной задачи течения и тепломассообмена в "ячейке". В "ячейке" возможно существование трех форм течения. Изучены характерные особенности каждой формы, определены границы их существования. Доказано, что при наличии III формы течения для решения задач тепло- и массообмена поле скоростей можно рассчитывать по предложенной упрощенной схеме. Впервые предложен для использования ряд важных локальных и интегральных характеристик массообмена в "ячейке" и исследовано влияние основных параметров технологического процесса на эти характеристики.

5. Изучено влияние свободной конвекции на физические процессы в "ячейке". Установлено, что влияние свободной конвекции в круговом поперечном сечении, характеризуемое отношением Gr/Re^2 при небольших числах Грасгофа ($Gr \leq 10^4$) и Рейнольдса ($Re < 50$) незначительно. Однако при этом очень значительно проявляется влияние свободной конвекции, возникающей за счет момента подъемных архимедовых сил по длине трубы в продольных плоскостях и характеризующейся отношением Gr/Re^3 . Исследовано влияние величины этого отношения на процессы тепломассообмена, проявляющееся в первую очередь в расслоении по угловой координате осевой скорости, концентрации и температуры. Проанализированы причины этого расслоения и предложено разделение течения на три режима в зависимости от значения отношения Gr/Re^3 .

6. Исследовано влияние свободной конвекции на основные характеристики массообмена. Сделан вывод о том, что свободная конвекция является нежелательным фактором, способствующим их ухудшению. Предложены пути уменьшения влияния свободной конвекции на процессы массообмена.

7. Доказано, что кремниевые пластины с достаточной для практики точностью можно считать изотермичными.

8. Проведено экспериментальное исследование температурных полей в горизонтальном реакторе с перпендикулярными потоку пластинами на специально созданной экспериментальной установке. Результаты качественно полностью согласуются с выводами теории.



ческого исследования. Количественное совпадение результатов теоретического расчета и эксперимента лежит в пределах 18%, что можно считать удовлетворительным, принимая во внимание неполную идентичность условий расчета и эксперимента.

9. Проведенное исследование позволило:

- выяснить физическую картину процессов, происходящих в рабочей зоне реактора;
- создать методику выбора оптимальных параметров техпроцесса по задаваемым неравномерностям распределения диффузанта по пластине и в партии пластин;
- обоснованно выставлять требования на новое технологическое оборудование при проектировании новых производственных комплексов.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Петражицкий Г.Б., Писаревский К.Е. Пространственное течение и тепломассообмен в горизонтальном реакторе с пластинами. - В кн.: Вопросы теплопередачи. МЛТИ, М., 1976, с.134-144.

2. Писаревский К.Е. Решение осесимметричной задачи течения несжимаемого вязкого газа в "ячейке" горизонтальной круглой трубы с пластинами методом конечных разностей. - Алгоритмы и программы. Информационный бюллетень. Материалы ГИАП. 1979, №5, инв.№ П003762.

3. Писаревский К.Е. Решение осесимметричной задачи теплообмена при вынужденной конвекции вязкого несжимаемого газа в "ячейке" горизонтальной трубы с пластинами методом конечных разностей. - Алгоритмы и программы. Информационный бюллетень. Материалы ГИАП. 1979, №5, инв.№ П003761.

4. Писаревский К.Е. Решение осесимметричной задачи диффузии в "ячейке" горизонтальной круглой трубы с пластинами методом конечных разностей. - Алгоритмы и программы. Информационный бюллетень. Материалы ГИАП. 1979, №5, инв.№ П003758.

Д-74108 от 30. II. 79г. Объем I,0 п.л. стр. 100

Зак. 1310 Типография МВТУ им. Баумана