

СОПРЯЖЕННАЯ ТЕПЛОТДАЧА ОТ U-ОБРАЗНОЙ КРЕМНИЕВОЙ ОСНОВЫ В МЕТОДЕ СИМЕНСА В РЕЖИМЕ ТЕРМОГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ

Митина А.В.¹, Митин К.А.^{1,2}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

При производстве поликристаллического кремния во всем мире в основном используется метод Сименса. На начальном этапе происходит перевод технического кремния в летучие силаны (моносилан, хлорсиланы, фторсиланы и др.) с последующей ректификационной очисткой. Затем проводится водородное восстановление полученного силана на поверхности разогреваемой электрическим током кремниевой основе. Чаще всего в качестве основы используют U-образные стержни-основы из прутков квадратного сечения получаемых путем продольного разрезания стержней моно- и поликремния [1-2].

В настоящее время количество U-образных стержней-основ в промышленных реакторах достигает 24-36 единиц. Разрабатываются современные отечественные реакторы, в которых стержни основы подвешиваются на верхнюю крышку ростовой камеры. Одной из самых важных проблем, при получении поликристаллов кремния, является определение оптимальных условий ведения технологического процесса. Оптимизация тепловых условий процесса сводится к необходимости обеспечить высокую степень изотермичности разогреваемого электрическим током кремниевого стержня.

На разогревом до высокой температуры вертикальном стержне при малых скоростях продувки газа через реактор развивается свободно-конвективный пограничный слой [3]. Теплообмен происходит в режимах смешанной или вынужденной конвекции. Полного подавления влияния сил плавучести в данной технологии добиться практически невозможно.

Для геометрий, характерных для реакторов водородного восстановления, исследования конвективно-теплообмена имеют или предварительный характер [2,4], или для них характерен крайне упрощенный подход [4]. Задачи теплообмена разогреваемых электрическим током тел до настоящего времени практически не исследованы. В предшествующих работах [5-8] решены задачи по определению полей температуры в проволоках и цилиндрических бесконечных телах или в тонких оболочках, характерных для авиационной и ракетной техники [8].

Отсюда следует постановка задачи в данной работе. В качестве первого шага рассмотрена задача сопряженного конвективного теплообмена U-образного стержня с квадратным поперечным сечением. Один U-образный стержень находится в прямоугольном контейнере с холодными изотермическими стенками. На поверхности стержня выбрана точка, в которой с помощью подбора напряжения электрического тока поддерживается постоянная температура.

Расчетная область (рис. 1) состоит из U-образного стержня – 1 и ростовой камеры, заполненной газом, – 2. Граница 3 – торцы кристалла. Граница 4 – слой

диэлектрика между кристаллом и стенками ростовой камеры. Граница 5 – стенки-образующие U-образного стержня различного пространственного расположения. Граница 6 – изотермические холодные стенки ростовой камеры. 7 – точка, в которой поддерживается постоянная в системе температура, она находится на грани zy , ее безразмерные координаты фиксированные: $z=2,0$ и $y=0,6$.

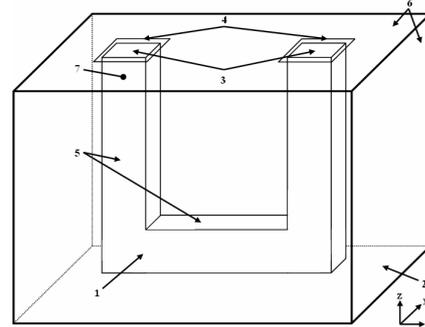


Рис. 1. Схема расчетной области

Процесс сопряженного конвективного теплообмена газа описывается безразмерной системой уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска, записанной в переменных температура, векторного потенциала поля скорости и вихря с учетом внутренних источников тепла в твердом теле:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla T = \frac{1}{Pr} \Delta T + \frac{R^2}{Pr \cdot (T_{max} - T_{min})} \frac{Q}{\lambda_{cr}} \\ -\nabla \times [\bar{\mathbf{v}} \times \bar{\boldsymbol{\omega}}] = \nabla \times [\nabla \times \bar{\boldsymbol{\omega}}] + Gr [\nabla \times (T \cdot \bar{\mathbf{g}})] \\ -\Delta \psi_x = \omega_x \quad -\Delta \psi_y = \omega_y \quad -\Delta \psi_z = \omega_z \\ \bar{\mathbf{v}} = \nabla \times \bar{\boldsymbol{\psi}} \quad -\frac{\sigma}{R^2} \Delta F = 0 \end{cases}$$

Здесь F – размерный потенциал электрического поля в кристалле, T – безразмерная температура, ω – безразмерный вихрь, ψ – безразмерный потенциал векторного поля, x , y и z – пространственные координаты, $R(T)$ – сопротивление кремния, зависящее от температуры. Соотношение $Q=U^2/R(T)$ определяет объёмную плотность выделяемого тепла при пропускании постоянного электрического тока, где U – локальное падение напряжения.

В безразмерных уравнениях $Gr = (\beta g / \nu^2) \times \Delta T \times R_K^3$ – число Грасгофа, по определению является отношением сил плавучести (силы Архимеда) к силам вязкого трения, а при заданной геометрии и параметрах газа может трактоваться как безразмерный перепад температуры. Число Прандтля $Pr = \nu / a$, $a = 3,74 \cdot 10^{-4} [m^2/c]$ – коэффициент температуропроводности, $\nu = 2,54 \cdot 10^{-4} [m^2/c]$ – кинематическая вязкость газа (аргон), $g = 9,8 [m/c^2]$ – ускорение силы тяжести, $\beta = 6,4 \cdot 10^{-4} [1/K]$ – коэффициент объемного расширения

газа. При приведении уравнений к безразмерному виду в качестве геометрического масштаба использовано $L = 0,1$ [м] – расстояние между центрами вертикальных стержней U-образного тела. За масштаб температуры взят $\Delta T = 70$ [К] – перепад температуры между контрольной точкой и стенками корпуса. Масштабом поля скорости выбрано v/L – отношение кинематической вязкости к геометрическому масштабу. Теплопроводность кремния $\lambda_s = 26$ [Вт/(м·К)], теплопроводность аргона $\lambda_g = 58,3 \cdot 10^{-3}$ [Вт/(м·К)]. Таким образом, при проведении расчетов число Прандтля $Pr = 0,68$ и число Грасгофа $Gr = 6800$.

На всех жестких поверхностях системы заданы условия непротекания и прилипания. Торцы U-образного тела и область диэлектрика теплоизолированы. На границах раздела «кристалл-газ» задано условие идеального теплового контакта.

Методом конечных элементов [9] решалась задача на установление. При решении использовалась равномерная кубическая конечноэлементная сетка с квадратичными базисными функциями. Значение вихря на твердых стенках вычислялось из значений компонент скорости с прошлой итерации. Размерность сетки составляла $89 \times 49 \times 89$ узлов.

При теплоотдаче от разогретого U-образного тела в режиме термогравитационной конвекции пространственная форма конвективных течений и пограничного слоя имеет сложный трехмерный вид. Важным моментом, определяющим локальные особенности конвективного течения и теплоотдачи у нижних торцов вертикальных стержней, является наличие горизонтальной перемычки.

В зазорах между внешними стенками U-образного стержня и холодными стенками корпуса устанавливается общее циркуляционное течение: восходящие потоки у боковых граней стержня и нисходящие потоки у стенок корпуса. В зазоре между нижней гранью перемычки формируется восходящее течение. В центральной части U-образного тела образуется восходящее течение, имеющее форму плоской струи практически по всей высоте слоя. Между дном камеры и перемычкой U-образного тела формируется слабый восходящий поток. Интересной особенностью восходящего потока, заключенного между кремниевой затравкой и стенками корпуса, является то, что с определенной высоты течение становится закрученным (Рис. 2).

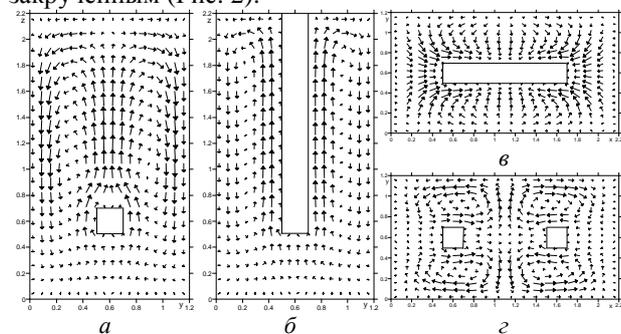


Рис. 2. Поле скорости в сечениях: а) $x=1,1$; б) $x=0,6$; в) $z=1,45$.

Поле температуры внутри U-образного стержня неоднородно. Слабый поток холодного газа из при-

донной области незначительно увеличивает эффективность охлаждения нижней части U-образного тела. Однако за счет выделения тепла внутри перемычки нижняя часть U-образного тела оказывается перегретой относительно верхней части, где находится контрольная точка. Внутренние грани U-образного тела разогреваются несколько сильнее, чем внешние грани. Это объясняется тем, что они подогреваются за счет восходящей струи разогретого на перемычке газа. На внешних гранях стержня, обращенных к торцевым стенкам корпуса, и на гранях, обращенных к лобовой и задней стенкам корпуса, за счет набегающих холодных потоков газа увеличиваются градиенты температуры. Максимальные градиенты температур наиболее неоднородны и смещены к торцам перемычки (Рис. 3).

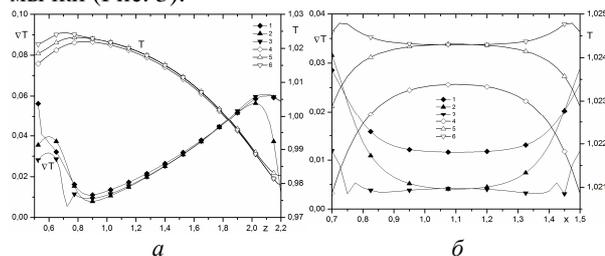


Рис. 3. Профили температуры и градиента температуры соответственно в сечениях $y=0,6$: а) 1, 4 – $x=0,5$; 2, 5 – $0,6$; 3, 6 – $0,7$, б) 1, 4 – $z=0,5$; 2, 5 – $0,6$; 3, 6 – $0,7$.

Результаты исследований представляют интерес для отработки начального этапа получения поликристаллических стержней кремния в реакторах водородного восстановления силана на разогретых за счет пропуска электрического тока стандартных стержнях-основах квадратного сечения.

Список литературы:

1. Фалькевич Э.С., Пульнер Э.О. Технология полупроводникового кремния//Металлургия, 1992. – 408 с.
2. Елютин А.В., Попов В.П., Иванов Л.С. Тепло- и массообмен в реакторах для получения полупроводникового кремния// Высококачественные вещества. – М, 1996. – № 1. – С. 92-101.
3. Бердников В.С., Дятлов А.В., Семенов В.И. Термогравитационная конвекция у вертикальных поверхностей теплообмена при переходных режимах течения// Сб. трудов Теплообмен и трение в однофазных потоках. – Новосибирск, 1988. – С. 5-26.
4. Бровин Д.С., Ловцос А.А., Колгатин С.Н. Одномерный подход к моделированию Siemens-процесса// Материалы электронной техники. – Новосибирск, 1996. – № 4. – С. 6-10.
5. Калашников С.Г. Электричество/ М.: Наука, 1970. – 668 с.
6. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел/ М.: Наука, 1964. – 488 с.
7. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел/ Ленинград: Энергия, 1968. – 304 с.
8. Лыков А.В. Теплообмен/ Изд. 2-е, перераб. и доп.. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
9. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач: Изд-во НГТУ, 2007. – 896 с.

Выражаем благодарность научному руководителю Бердникову В.С. за постановку задачи и обсуждение результатов. Работа была поддержана СО РАН (проект III.18.2.5. Гос. Рег. 01201350443) и РФФИ (грант 12-08-00487а).