

УДК 621.315.592:548.4

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ НА ВРАЩЕНИЕ РАСПЛАВА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ТИГЛЕ

© 2011 г.

Н.А. Вerezуб

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

verezub@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Рассмотрена оптимизация тепловых условий применительно к процессу выращивания монокристаллов кремния методом Чохральского. Изучено влияние скорости вращения тигля на теплоперенос в расплаве, представляющее большой научный и практический интерес. Особое внимание обращено на изменение азимутальной скорости расплава в подкристалльной области при увеличении скорости вращения тигля, вызывающее изменение формы фронта кристаллизации. Поведение радиальной неоднородности азимутальной скорости при изменении скорости вращения тигля исследуется при различной интенсивности тепловой конвекции в расплаве, что развивает известные представления об «эффекте максимума» для других субстанций (температура и концентрация примеси). Возможности тепловой оптимизации исследованы на основе интегрированной математической модели при использовании комплекса программ «Crystmo/Marc».

Ключевые слова: метод Чохральского, тепловая конвекция, математическая модель, форма фронта кристаллизации, «эффект максимума».

1. Формулировка задачи

Фрагмент расчетной модели процесса вытягивания методом Чохральского монокристалла кремния 1 из расплава 2, содержащегося в тигле 3 и окруженного тепловыми экранами 4, 5, приведен на рис. 1.

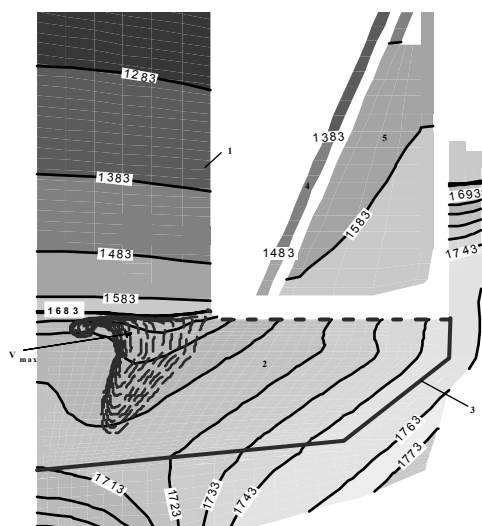


Рис. 1

Исследования выполнены на основе интегрированной математической модели при использовании комплекса программ «Crystmo/Marc»

[1, 2]. При анализе конвективного движения расплава учитывается вынужденная конвекция от вращения кристалла и тигля и тепловая гравитационная конвекция, параметрами которых являются соответствующие безразмерные критерии подобия. Для вынужденной конвекции это числа Рейнольдса (Re) и Россби ($Ros = \Omega_c / \Omega_s$, где Ω_s и Ω_c – скорости вращения кристалла и тигля). Отрицательное значение Ros соответствует вращению кристалла и тигля в противоположные стороны. Для тепловой гравитационной конвекции задается число Грасгофа (Gr) и число Прандтля (Pr). Масштабами длины и скорости являются радиус R_s и скорость вращения кромки кристалла $\Omega_s R_s$. В расчетах принято: число $Re = 5.5 \cdot 10^3$, числа Грасгофа и Россби – переменные ($Gr = 3.0 \cdot 10^7 - 1.5 \cdot 10^8$, $Ros = -(0.1 - 0.5)$). Анализируемый параметр подобия, не зависящий от вязкости ($\gamma = Gr^{0.5} / Re$), изменялся в диапазоне (0.1–2.2). Нижний и верхний пределы выбраны с расчетом преобладания вынужденной или тепловой гравитационной конвекции.

2. Результаты расчетов

Температурное поле в растущем кристалле, расплаве и тепловом экране показано на рис. 1 при малой скорости вращения тигля ($Ros = -0.1$). Пунктирные изолинии азимутальной скорости отвечают значениям, превышающим

V_c . Сравнение этого режима с выращиванием при большей скорости вращения тигля ($Ros = -0.5$) показывает важные отличия в форме фронта кристаллизации: в первом случае она является W -образной, во втором – вогнутой в кристалл, что согласуется с экспериментальными данными [1].

Существуют отличия в распределении изотерм для этих двух случаев. Осевое смещение изотерм в подкристалльной области при малой скорости вращения тигля является более значительным, что свидетельствует о наличии подкристалльного вихревого течения. Его возникновение объясняется большей величиной азимутальной скорости, изолинии которой показаны пунктирными линиями на рис. 1. Значения этих изолиний превышают величину азимутальной скорости на боковой стенке тигля, равную $V_c = \Omega_c R_c$. Это явление известно как «эффект максимума» для задач конвективного теплопереноса в замкнутых областях. В данном случае оно имеет место и в гидродинамической модели Чохральского, когда при совместном действии вращения тигля и тепловой гравитационной конвекции влияние последней является преобладающим. Меридиональное движение расплава, вызванное тепловой конвекцией, переносит момент вращения M от боковой стенки тигля вглубь расплава – в подкристалльную область. Его величина для радиуса r в подкристалльной области, равная $M = \Omega r^2$, не превышает значения на боковой стенке тигля $M_c = \Omega_c R_c^2$. Однако при меньшем r величина азимутальной скорости $V = M/r$ становится больше ее значения на стенке тигля V_c .

В случае преобладания вынужденного течения, вызванного вращением тигля (при $Ros = -0.5$) этот «эффект максимума» исчезает. При этом в большей части расплава (за исключением узкого слоя под кристаллом) радиальное распределение момента вращения соответствует монотонному профилю, изменяющемуся от $M = 0$ в центре области до максимального значения M_c на боковой стенке тигля. Обобщенные и практически значимые зависимости максимальной неоднородности азимутальной скорости $\delta V_{\max} = (V_{\max} - V_c)/V_c$ от числа Ros при разных значениях параметра γ приведены на рис. 2. При $Ros = -0.1$ и малом значении $\gamma = 0.1$ «эффект максимума» не наблюдается, однако при большем значении $\gamma = 0.3$ он становится заметным. По профилю неоднородности V , построенному в за-

висимости от Ros при $\gamma = 0.6$ (сплошная линия), можно выделить два гидродинамических режима, первый из которых соответствует преобладанию влияния тепловой конвекции при $Ros = -(0.01-0.5)$, второй, при $Ros < -0.5$, соответствует преобладающему влиянию вращения тигля. Сравнение аналогичного профиля при $\gamma = 0.1$ (пунктир) показывает, что при большем значении γ неоднородность V возрастает и начало второго режима сдвигается до $Ros = -0.65$. При больших значениях $\gamma = 1.7$ и 2.2 , соответствующих $Ros = -0.57$, отмечается также большая неоднородность V и переход ко второму режиму сдвигается в диапазон очень больших (не технологических) значений скорости V_c .

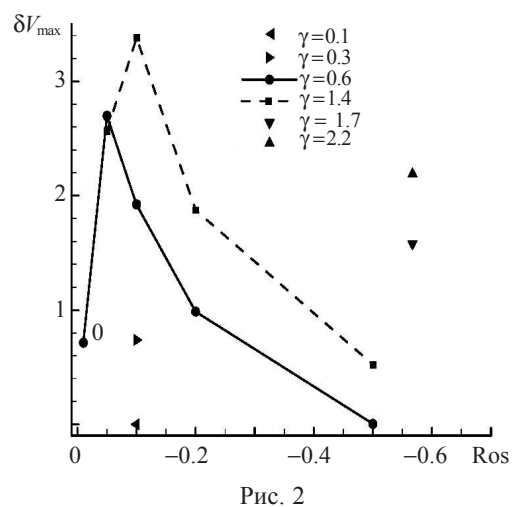


Рис. 2

Таким образом, численное решение задачи показало, что изменение формы фронта кристаллизации от W -образной к вогнутой связано с уменьшением роли тепловой конвекции при усилении вынужденной, вызванной увеличением скорости вращения тигля.

Соавтор – А.И. Простомолотов (ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва).

Исследование поддержано проектом РФФИ №10-02-90004-Бел_а.

Список литературы

1. Везуб Н.А., Простомолотов А.И. // Материалы электронной техники. 2000. № 3. С. 28–34.
2. Простомолотов А.И., Везуб Н.А., Ильясов Х.Х. Программа «CRYSTMO/MARC» для сопряженного теплового моделирования. Свидетельство о гос. рег. программ для ЭВМ № 2009613989. 2009.

**THE EFFECT OF THERMAL CONVECTION ON THE MELT ROTATION
IN A CYLINDRICAL CRUCIBLE***N.A. Verezub*

The optimization of thermal conditions for Czochralski silicon single crystal growing is considered. The effect of crucible rotation rate on heat transfer in a melt has the great scientific and practical interest. Special attention is given to the change of an azimuthal velocity in a subcrystal region of a melt with the increasing rotation rate of the crucible leading to the change of the liquid-solid interface shape. The radial inhomogeneity of an azimuthal velocity connected with the crucible rotation was studied at different intensities of a melt thermal convection. It develops the famous «effect of maximum» well-known in other substances (temperature and impurity concentration). Possibility of thermal optimization was investigated based on the integrated mathematical model using the «Crystmo/Marc Code».

Keywords: Czochralski method, thermal convection, mathematical model, liquid-solid interface shape, «effect of maximum».