**РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНАЯ ТЕПЛООТДАЧА ОТ КРИСТАЛЛОВ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В МЕТОДАХ ВЫТЯГИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ РАСПЛАВА**

Бердников В.С., Митин К.А.

*Институт теплофизики им.С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск,* [*berdnikov@itp.nsc.ru*](mailto:berdnikov@itp.nsc.ru)

Структурное совершенство монокристаллов получаемых методами вытягивания со свободной поверхности расплава (Чохральский, Киропулоса, Степанова) в значительной мере зависит не только от процессов на стадии перехода от расплава к твердому телу, но и от тепловой истории кристалла. Из результатов исследований конвективного теплообмена в расплаве следует, что для расплавов с любым значением числа Прандтля существуют соотношения безразмерных динамических параметров – чисел Грасгофа Gr, Марангони Ma и Рейнольдса Re, характеризующих интенсивность и относительную роль свободной и вынужденной конвекции, при которых фронт кристаллизации будет плоским [Бердников, 2011]. Результаты исследований конвективного теплообмена в расплавах и его влияния на формы фронта кристаллизации были получены без учета теплоотдачи от кристалла в окружающую среду. Но в реальном высокотемпературном технологическом процессе теплообмен имеет сложный сопряженный характер и поля температуры самосогласованны во всей ростовой камере. Сопряженные процессы теплообмена между кристаллом, расплавом и окружающей средой, управление тепловыми условиями роста кристалла являются достаточно сложной задачей, поэтому ранее проведенные исследования имеют частный характер. В узком диапазоне параметров показано, что радиационно-конвективная теплоотдача от кристалла в окружающую среду ростовой камеры в процессе роста влияет на поля температуры внутри кристалла и в режиме сопряженного теплообмена не только корректирует кривизну фронта кристаллизации, но и определяет объемное распределение собственных точечных дефектов [Простомолотов, 2008].

Для понимания общих закономерностей зависимости полей температуры и термических напряжений задачу можно решать в рамках частичного моделирования, но в многопараметрической постановке. Численно методом конечных элементов исследована радиационно-конвективная теплоотдача от кристаллов в окружающую среду ростовой камеры. Радиационные потоки вычислялись с помощью зонального метода. В качестве расчетной области взята верхняя часть ростовой камеры, состоящей из монокристалла, штока, стенок ростовой камеры и экрана отделяющего поверхность расплава от ростовой камеры. На всех жестких поверхностях системы заданы условия прилипания и непротекания. На образующих кристалла, затравки и штока задано условие идеального контакта. Стенки корпуса ростовой камеры холодные изотермические. На плоском фронте кристаллизации задана температура кристаллизации конкретного материала (кремний, сапфир). Теплопроводность кристалла оказывает значительное влияние на распределения поля температуры в кристалле. От нее зависят закономерности теплоотдачи с ростом длины кристалла. При высокой теплопроводности кристалла определяющую роль играет кондуктивный механизм теплообмена, кристалл прогревается заметно равномерней по сравнению с низкотеплопроводными кристаллами. Заметную роль играют геометрические и теплофизические параметры затравки и штока: при увеличении диаметра затравки или уменьшении длины затравки, а так же при высокой теплопроводности штока за счет кондуктивного механизма теплообмена увеличивается теплоотвод от кристалла. В результате чего существенно возрастают осевые градиенты температуры во всем объему кристалла. Конвективный теплообмен существенно влияет на распределение температуры в кристаллах и приводит к эффективному охлаждению основания кристалла. Это связано с тем, что охлажденные на холодных стенках корпуса ростовой камеры потоки газа набегают на раскаленное основание кристалла. В результате, в значительной мере вырастают осевые и радиальные градиенты температуры у основания кристалла. Радиационная теплоотдача существенно меняет распределение температуры на поверхности и внутри кристалла, значительно возрастают радиальные градиенты температуры и локальные тепловые потоки с боковой поверхности кристалла.

Работа выполнена при поддержке СО РАН (проект III.18.2.5. Гос. рег. 01201350443) и РФФИ (грант 15-08-07991а).

*Литература:*

1. Бердников В.С., Винокуров В.А., Винокуров В.В., Гапонов В.А. Влияние режимов конвективного теплообмена на форму фронта кристаллизации в системе тигель-расплав-кристалл в методе Чохральского // Тепловые процессы в технике.− 2011. − Т. 3, №4. − С. 177.

2. Простомолотов А.И., Мильвидский М. Г. Моделирование тепловых процессов и дефектообразования при выращивании и термообработке бездислокационных монокристаллов и пластин кремния // Изв. Вузов. Материалы электрон. техники. − 2008. №3. − С. 49-53.