



Управление вихреобразованием при выращивании трубчатых кристаллов¹

Везуб Н.А., Простомолотов А.И.

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

Введение

Актуальными являются разработки непланарных технологий на основе монокристаллических трубок кремния малого диаметра, предназначенных для изготовления на их основе мощных силовых полупроводниковых приборов. Вытягивание из расплава трубок малого диаметра (35 мм) сопряжено со значительными трудностями в обеспечении необходимого вихреобразования внутри трубки. В данной работе использовалось малогабаритная установка Редмет-10, предназначенная для вытягивания монокристаллов кремния по Чохральскому. В конструкцию теплового узла этой установки были внесены существенные изменения с учетом результатов проведенного математического моделирования процессов гидродинамики, позволившие вырастить монокристаллические трубки кремния малого диаметра.

Компьютерная модель

В данной работе применялась интегрированная математическая модель [1], и программный

комплекс Crystmo/Net [2], позволяющая параметрически исследовать гидродинамику, перенос тепла и примеси в расплаве кремния и на основе этого оптимизировать условия выращивания трубок кремния. Разработанный расчетный макет модифицированного теплового узла показан на Рис. 1.

Для кристаллизации трубы необходимо определить тепловые условия для выращивания трубок, когда в центральной области расплава (внутри трубы) формируется более высокотемпературная зона, чем под её стенками. С этой целью моделировались условия, обеспечивающие больший нагрев дна тигля при применении одного стандартного бокового нагревателя за счет надлежащего выбора положения тигля относительно нагревателя. Заметим, что при малом диаметре трубки создание требуемого радиального градиента температур вызывает значительные трудности при экспериментальной отработке процесса выращивания.

Результаты моделирования

Предполагается, что тигель и кристалл вращаются в одну сторону со скоростью 10 об/мин. Расчетные параметры (критерии подобия): $Re = 2120$, $Gr = 6.2 \times 10^6$, $Pr = 10^{-2}$. В расчетах варьировалось вертикальное положение тигельной сборки (1) относительно неподвижных элементов теплового узла (2÷5).

¹Работа выполнена по теме госзадания ИПМех РАН (№ государственной регистрации 123021700045-7).

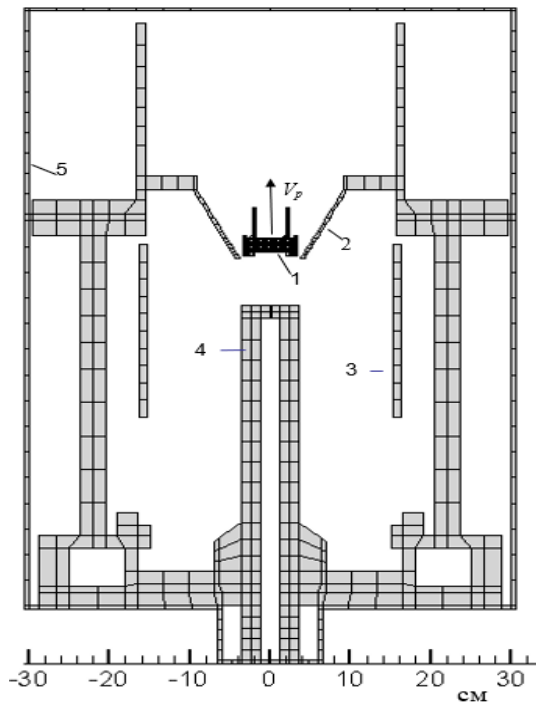


Рис. 1. Расчетная схема теплового узла для выращивания монокристаллических трубок кремния методом Чохральского на установке Редмет-10: 1 – ростовая сборка (трубка и расплав кремния, кварцевый тигель, подставка тигля), 2 – тепловой экран, 3 – нагреватель, 4 – полый нижний шток, 5 – корпус. V_p – скорость вытягивания трубки, Ω_C – скорость вращения тигельной сборки

Результаты параметрических расчетов приведены на Рис. 2 и 3: тепловые поля в ростовой сборке и структура течения расплава для двух характерных ее положений. Изотерма $T = 1683$ К соответствует положению фронта кристаллизации крем-

ния.

В нижнем положении ростовой сборки (1) (Рис. 2(a), (б)) боковые стенки тигля практически не закрыты экраном (2) и значительно прогреваются за счет радиационного потока тепла от нагревателя (3).

В верхнем положении ростовой сборки (Рис. 3(a), (б)) боковая стенка тигля с расплавом полностью закрыта от радиационного потока тепла от нагревателя. При этом преобладает донный нагрев, что заметно по перегреву центра расплава. Вытягивание трубки заданного диаметра происходит устойчиво. Однако при этом, по сравнению с предыдущим вариантом, примерно на 20 % увеличивается мощность нагревателя. Можно отметить характерную особенность процессов теплопереноса в тепловом узле Редмет-10, что особенно заметно для верхнего положения ростовой сборки, когда нужный прогрев дна тигля достигается после надлежащего нагрева вершины нижнего штока (4). Процесс нагрева тигля происходит как бы в два этапа: на первом за счет тепловой радиации от нагревателя нагревается вершина нижнего штока (4) до значительной температуры, а на втором этапе тепловая радиация от штока снизу приводит к разогреву дна тигля.

Заключение

Выбор метода Чохральского для выращивания монокристаллических труб малого диаметра потребовал существенной модернизации теплового узла стандартной ростовой установки Редмет-10. Его модернизация была связана с оптимизацией размещения тигля с расплавом относительно стандартного нагревателя и бокового конического экрана, что потребовало проведения компьютерного моделирования термомеханических процессов и верификации расчетных данных с соответствующими

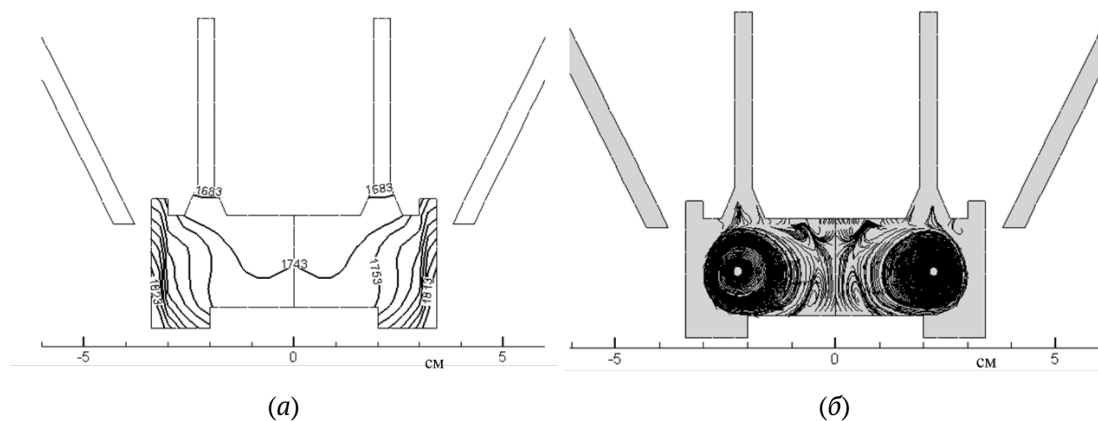


Рис. 2. Нижнее положение ростовой сборки: (а) – изотермы [K], (б) – траектории течения расплава

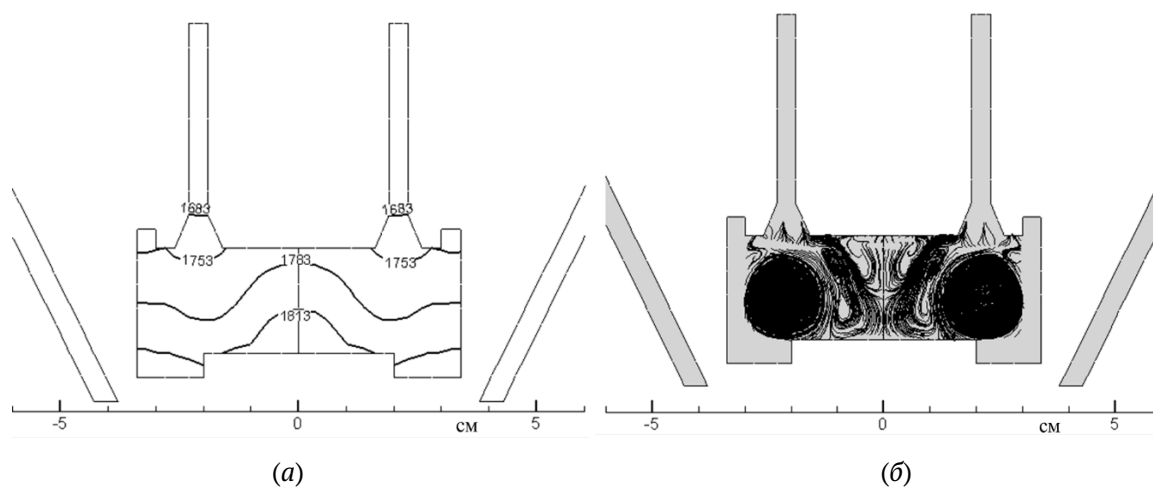


Рис. 3. Верхнее положение ростовой сборки: (а) – изотермы [К], (б) – траектории течения расплава

щими температурными измерениями с помощью термопар. Экспериментальная апробация показала, что выращенные трубки монокристаллического кремния малого диаметра имеют нужные размеры и обладают надлежащими электрофизическими свойствами для изготовления на их основе силовых полупроводниковых приборов по непланарной технологии.

Список литературы

- [1] *Верезуб Н. А., Простомолотов А. И.* Механика процессов выращивания и термообработки монокристаллического кремния // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2020. № 5. С. 51–63.
- [2] *Prostomolotov A., Ilyasov H., Verezub N.* Crystmo/Net remote access code for Czochralski crystal growth modelling // Science and Technology. 2013. V. 3. No 2A. P. 18–25.