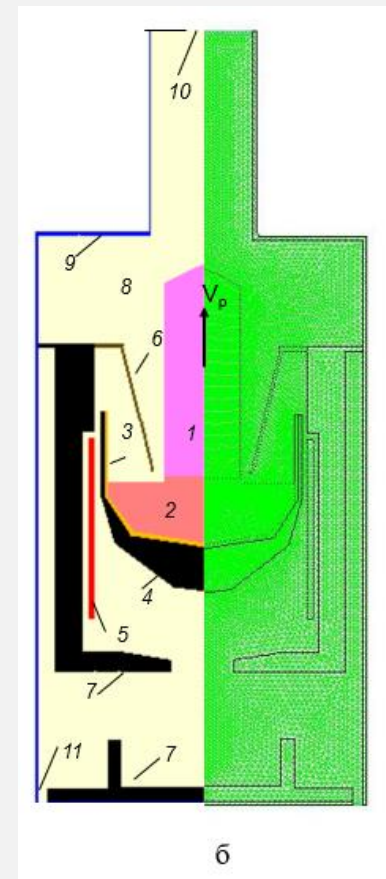
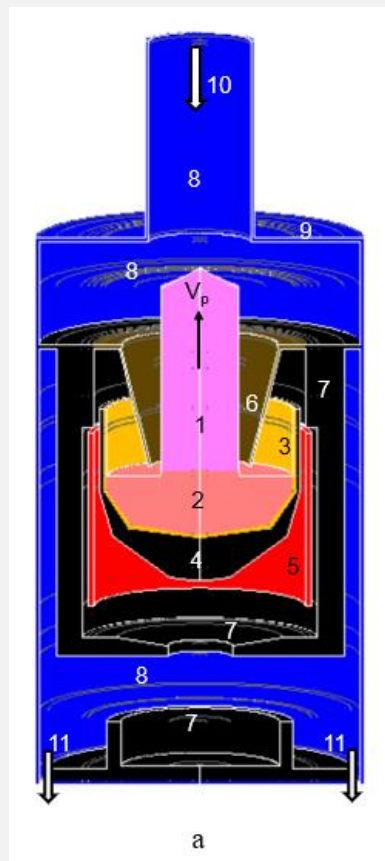


## Влияние газодинамики в процессе Чохральского на дефектообразование в монокристаллах кремния

А.И. Простомолотов, Н.А.Верезуб (e-mail: aprosto@inbox.ru)

В докладе анализируется роль  
околокристального (ОК) экрана  
в процессе Чохральского



Модельные изображения ростовой камеры Редмет-90М: а) трехмерный вид и б) осесимметричный вид с расчетной сеткой. Здесь: вытягиваемый со скоростью  $V_p$  монокристалл 1, расплав 2, тигель 3, подставка тигля 4, нагреватель 5, околокристальный экран 6, боковой и донные экраны 7, внутренность 8 и оболочка 9 камеры, отверстия для втекания 10 и вытекания 11 газа.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Методом математического моделирования исследуется влияние околористального экрана на процессы газо-гидродинамики, переноса тепла и примесей при выращивании монокристаллов методом Чохральского.

Для этого исследования выбрана компоновка теплового узла отечественной большегрузной установки *Редмет-90М*, позволяющей выращивать монокристаллы диаметром 200 мм и длиной до 1.5 м. Ростовый процесс происходит в условиях прокачки аргона в разреженной атмосфере теплового узла. Высокотемпературный нагрев обеспечивает плавление расплава кремния в тигле и его кристаллизацию путем вытягивания монокристалла по Чохральскому.

Математическая модель [1] учитывает в сопряжении процессы теплообмена и переноса монооксида кремния. Рассматривается воздействие околористального экрана на осевое распределение температуры в выращиваемом монокристалле, которое при условии его бездислокационности характеризует тип образующихся собственных точечных дефектов.

Обсуждаются результаты международного теста по влиянию околористального экрана на осевое распределение температуры в тепловом узле установки *EKZ-1300*. Приводятся данные технологического теста в тепловом узле установки *EKZ-1600ЭЛМА*, которые иллюстрируют применение теории дефектообразования В.В. Воронкова [2].

---

[1] Prostomolotov A.I., Verezub N.A. Mechanics of crystalline materials production processes. M.: MISIS. 2025. 528 p. <https://doi.org/10.61726/8938.2025.84.83.001>

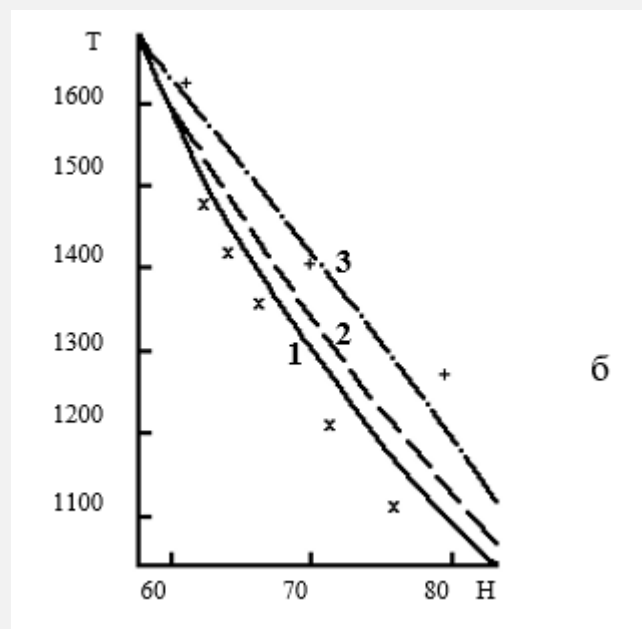
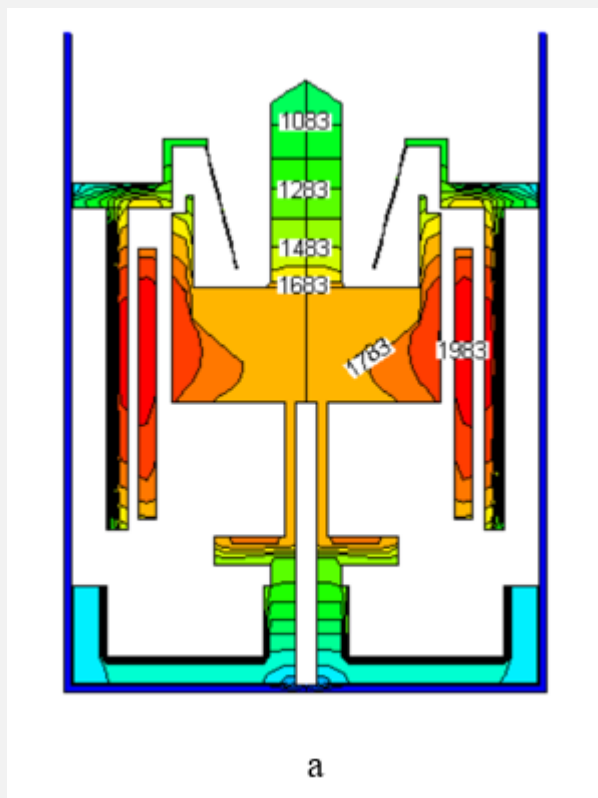
[2] Епимахов И.Д., Куцев М.В., Присяжнюк В.П. и др. Выращивание монокристаллов кремния в установке EKZ-1600. Моделирование процесса теплопереноса // Электронная промышленность. 2003. № 3. С. 15-17.

**Таблица 1.** Теплофизические свойства компонент теплового узла

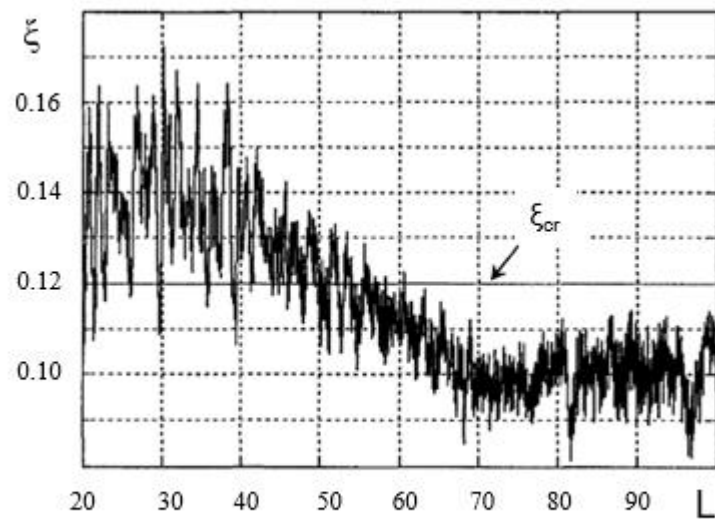
| Материал           | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $C_p$ , Дж/г·К | $\varepsilon$ | $\lambda$ , Вт/см·К  |
|--------------------|----------------------------|----------------|---------------|--|
| Кремний – кристалл | 2.33                       | 1.0            | 0.70          | $-0.47+2.0 \cdot 10^{-4}T+580/T$   |
| Кремний – расплав  | 2.53                       | 0.91           | 0.30          | 1.1  |
| Кварц              | 2.2                        | 1.24           | 0.85          | 0.04   |
| Графит             | 1.74                       | 1.0            | 0.8           | $0.7587-4.8751 \cdot 10^{-4}T+1.369 \cdot 10^{-7}T^2 - 1.6226 \cdot 10^{-11}T^3$ |
| Сталь              | 8.0                        | 0.5            | 0.45          | 0.15   |

**Таблица 2.** Параметры аргона при 1000 К и  $1.8 \times 10^{-3}$  атм (14 торр)

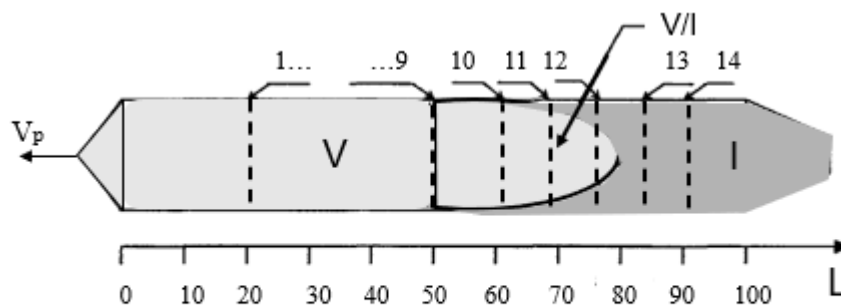
| Название                              | Размерность        | Величина              |
|---------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Молярная масса                        | г/моль             | 39.9                  |
| Коэффициент теплового расширения      | К <sup>-1</sup>    | $10^{-3}$             |
| Коэффициенты теплоемкости             | эрг/(г·К)          | $5.20 \times 10^6$    |
| Плотность                             | г/см <sup>3</sup>  | $8.94 \times 10^{-6}$ |
| Кинематическая вязкость               | см <sup>2</sup> /с | 56.1                  |
| Коэффициент теплопроводности          | Вт/см·К            | 4000                  |
| Коэффициент диффузии SiO <sub>2</sub> | см <sup>2</sup> /с | 77.3                  |



Данные теста для *EKZ-1300*: а – изотермы [K]; б – осевые распределения температуры  $T$  [K] вдоль боковой поверхности кристалла  $H$  [см] (расчет 1,2,3) и (измерения  $\times$ ,  $+$ ). Здесь:  $\times$ , 1 – с экраном;  $+$ , 2 – без ОК-экрана при  $\epsilon = 0.3$  и 3 – при  $\epsilon = 0.45$ .

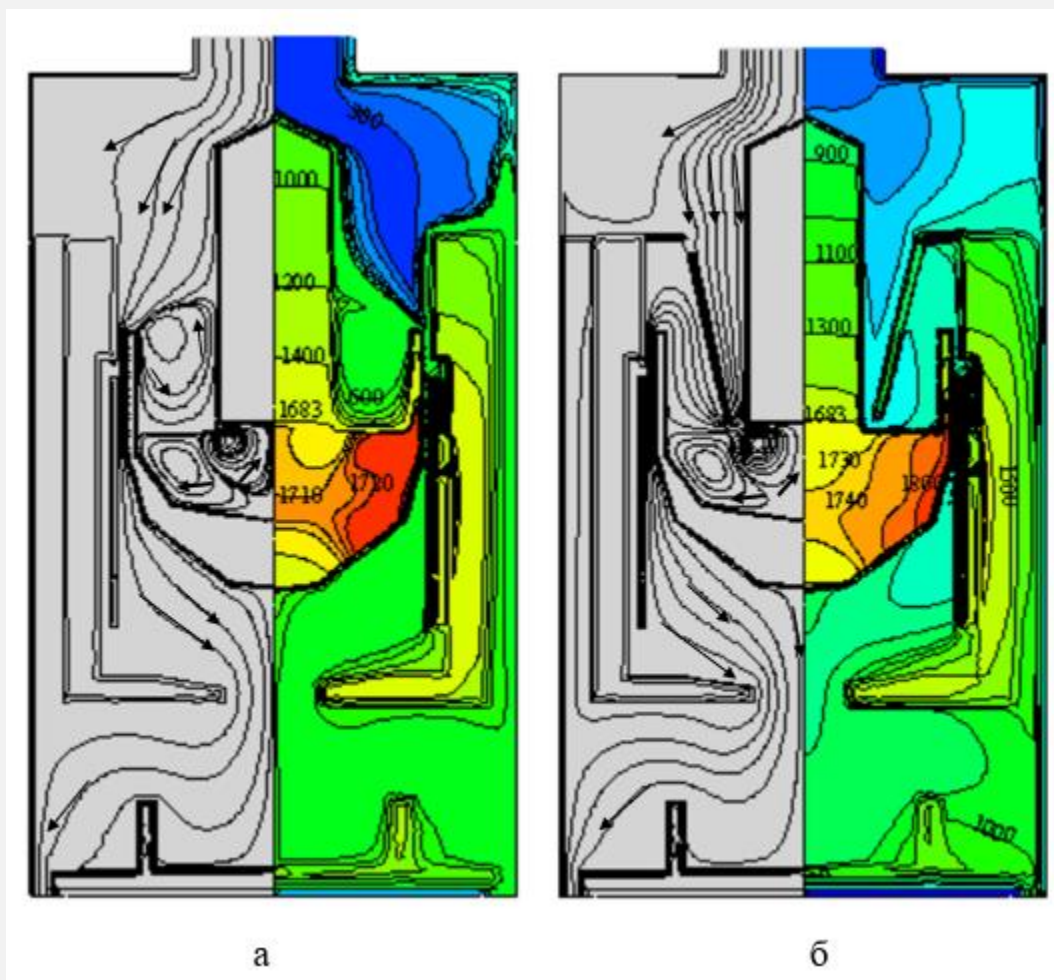


а

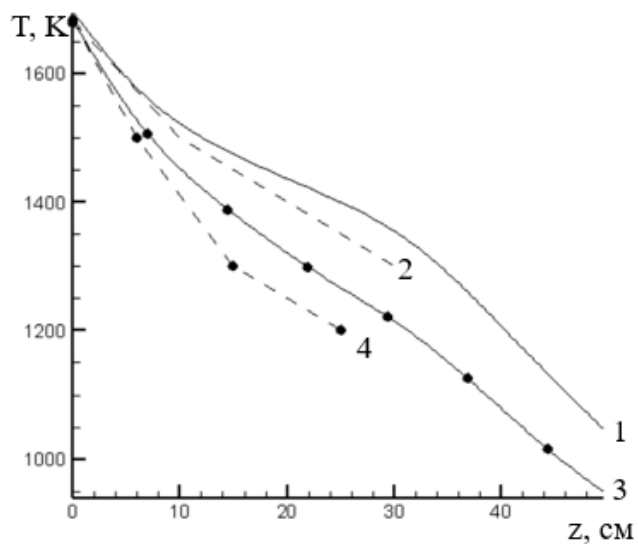


б

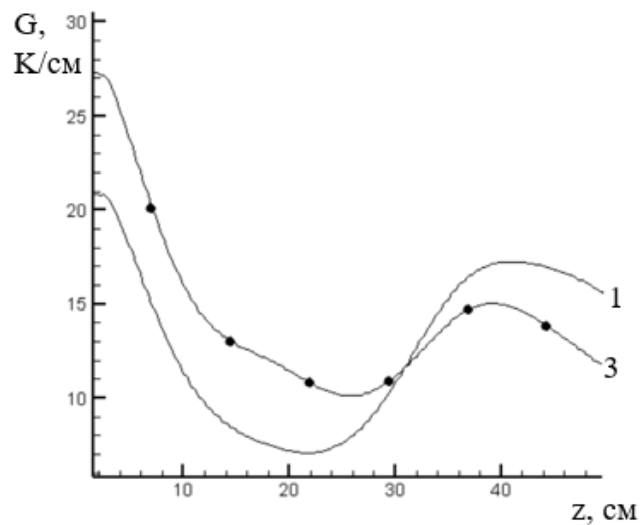
Изменение критерия Воронкова  $\xi$  [мм<sup>2</sup>/мин×К] вдоль длины кристалла  $L$  [%] (а) и распределение микродефектов в выращенном кристалле (б). Здесь V/I – область дефектов упаковки (ОДУ).



Линии тока в газе и расплаве (слева от оси) и изотермы [K] (справа): при отсутствии (а) и наличии (б) ОК-экрана.

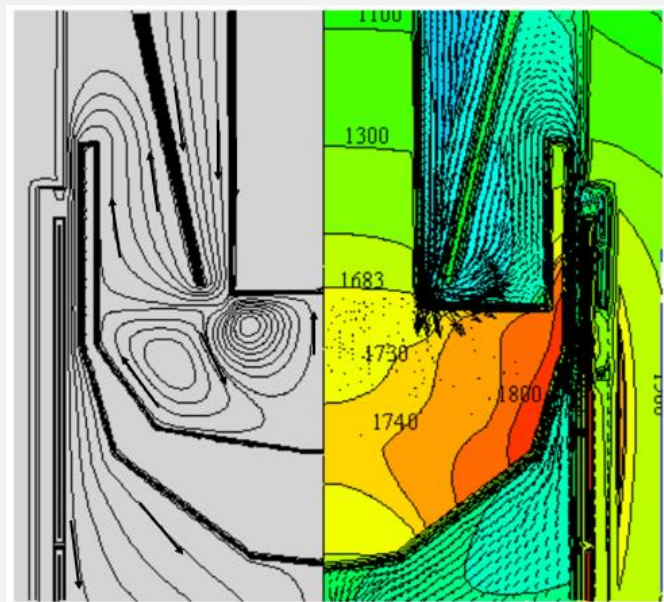


а

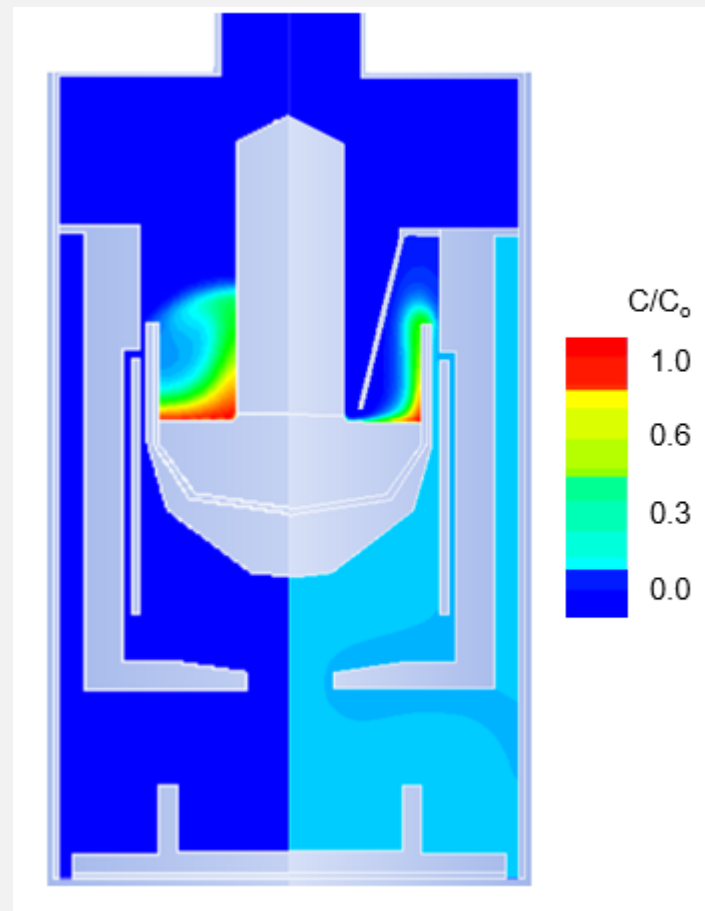


б

Распределения вдоль оси кристалла  $z$  [см]:  
 (а) температуры  $T$  [K] и  
 (б) осевого градиента температуры  $G$  [K/см] на  
 боковой поверхности при отсутствии (1, 2) и  
 наличии (3,4) ОК-экрана.  
 Для длины кристалла 50 см – графики (1, 3) и для 25  
 см – графики (2, 4).



Увеличенный фрагмент картин линий тока (слева от оси), векторов течения газа и изотерм [K] при наличии ОК-экрана.



Цветная заливка области и значения цветов для распределения концентрации монооксида кремния при отсутствии (слева от оси) и наличии (справа) ОК-экрана.



## ВЫВОДЫ

Отмечено широкое применение ОК-экрана в технологической практике для процесса Чохральского. При этом используется различный дизайн этого экрана при выращивании монокристаллов кремния. В данной работе проанализировано применение ОК-экрана в виде простейшей конструкции – конической поверхности, обращенной меньшим основанием вниз. Обзор предшествующих публикаций для установок типа *EKZ-1300/1600* для выращивания монокристаллов кремния диаметром 100 мм показал, что такой экран увеличивает осевой градиент температуры в выращиваемом монокристаллическом слитке, что согласно критерию В.В. Воронкова при той же скорости вытягивания слитка способствует увеличению роли межзельных СТД. Применение такого типа ОК-экрана рассмотрено для отечественной большегрузной установки *Редмет-90М*, позволяющей выращивать монокристаллические слитки кремния диаметром 200 мм. Показано, что ОК-экран оказывает значительное влияние на газодинамику аргона в разреженной атмосфере ростовой камеры: при отсутствии этого экрана от основного течения газа отделяется вихрь в области между кристаллом и боковой стенкой тигля, а при наличии этого экрана поток газа полностью обтекает кристалл и ускоряется в области сужения конической поверхности экрана. Отмечается, что такое изменение газового потока значительно увеличивает осевой градиент температуры на ФК выращиваемого кристалла. Изменением угла конусности можно влиять на скорость газа в конусном сужении экрана и тем самым надлежащим образом изменять осевой градиент температуры на ФК с целью влияния на концентрацию СТД, усиливая или ослабляя определенный тип дефектов (вакансонных пор или агломератов межзельных атомов).

Также отмечается, что наличие ОК-экрана существенно изменяет направление переноса монооксида кремния от поверхности расплава. При отсутствии этого экрана, обуславливающим возникновение вихря в области между боковыми поверхностями кристалла и тигля, транспорт монооксида кремния ограничивается размерами этой области. В тоже время наличие этого экрана дает возможность транспорта монооксида кремния по направлению газового потока в нижнюю часть ростовой камеры.

В целом можно отметить, что роль ОК-экрана до настоящего времени исследовалась лишь в части транспорта «вредных» примесей, образующихся в ростовом процессе, а также в части снижения энергетических затрат на процесс. Однако, в данной работе показано, что также важное влияние ОК-экран может оказывать на режим образования дефектов в выращиваемом бездислокационном монокристаллическом слитке. Для оценок эффективности такого влияния для конкретных ростовых установок полезным будет проведение математического моделирования, аналогичного изложенному в данной работе.