

## ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПРИ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА РАСПЛАВ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ ПЛАВАЮЩЕЙ ЗОНЫ

### АННОТАЦИЯ

В работе приводятся результаты математического моделирования и анализа конвективного теплопереноса при вибрационных воздействиях на расплав применительно к выращиванию монокристаллов методом плавающей зоны. Моделирование осуществляется на основе численного решения уравнений Навье — Стокса и уравнения сохранения энергии [1]. Показано, что вибрации являются хорошим перемешивающим механизмом и могут уменьшать температурные пограничные слои для расплавов полупроводников с малым значением числа Прандтля.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Вибрации могут быть эффективным управляющим фактором в различных технологических процессах, в частности, при выращивании монокристаллов, влияющим на совершенство кристаллов, на распределение температуры (примеси) и на скорость кристаллизации. Управляемые вибрационные воздействия являются энергоэкономичными и более простыми, чем, например, гравитация и магнитное поле. Ранее в работах [2—4] было показано существенное влияние на толщину пограничных слоев для жидкостей с числом Прандтля больше единицы ( $Pr > 1$ ), в данной работе показано, что данный эффект существует и для расплавов полупроводников ( $Pr = 0.01$ ). В данной работе приводятся результаты математического моделирования и анализа гидродинамики и теплопереноса при вибрационных воздействиях применительно к процессу выращивания монокристаллов методом плавающей зоны. Выполнены численные расчеты конвективного теплопереноса для реальной криволинейной формы жидкой плавающей зоны с учетом и без учета следующих факторов: излучения, вращения, вибраций, гравитационной и термокапиллярной конвекции.

Показано что вибрации могут уменьшать температурный пограничный слой и увеличивать температурный градиент на фронте кристаллизации, что может интенсифицировать теплообмен и, в частности, скорость роста кристаллов.

### 2. МЕТОД ЗОННОЙ ПЛАВКИ

#### 2.1. Постановка задачи

Численное моделирование конвективного теплопереноса для модели плавающей зоны (рис. 1) было проведено на основе решения двумерных

уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска с учетом осевой симметрии.

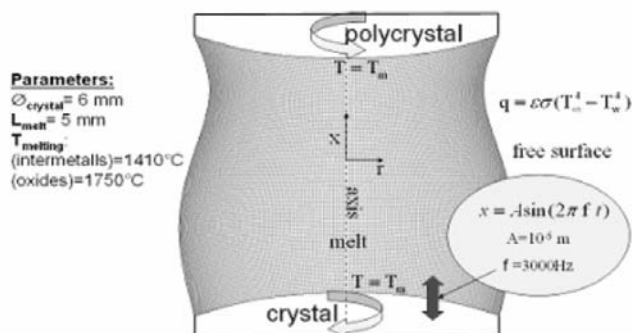


Рис. 1. Расчетная область метода плавающей зоны

На рис. 1 показана расчетная область радиусом  $R = 3$  мм и высотой 5 мм, а также сетка, граничные условия и некоторые параметры расчетов. В данных расчетах рассматривалась только фиксированная жидкая зона, геометрия которой была определена предварительно, на основе расчетов уравнения равновесия при наличии силы тяжести и с учетом значения угла смачивания для кремния, равного 111 градусам. На фронтах плавления и кристаллизации задавалось постоянное значение температуры, равное температуре кристаллизации  $T_{кр} = 1683$  К. На свободной боковой поверхности задавался постоянный поток излучения с коэффициентом степени черноты, равным 0.3, и температурой источника излучения  $T_{\infty} = 2200$  К. В данных расчетах рассматривались вибрации только нижней границы жидкой зоны (кристалла). Были проведены параметрические расчеты с разными амплитудно-частотными характеристиками вибрационного воздействия со стороны нижней границы  $x = A \sin(2\pi f t)$ , но в данной работе представлены результаты для следующих параметров: частота  $f = 3$  кГц и амплитуда  $A = 10 \mu\text{m}$ , скорости вращения кристалла и поликристалла имели противоположные направления  $\pm 30$  грт, остальные теплофизические параметры брались для расплава кремния Si ( $Pr = 0.01$ ) при температуре, близкой к температуре кристаллизации.

Численное решение осуществлялось с помощью пакета программ Fluent [5]. При моделировании вибраций учитывалось перемещение вибрирующей границы и использовалась динамическая сетка.

## 2.2. Результаты расчетов

Результаты расчетов показали, что для зонной плавки так же, как и для метода Бриджмена, вибрации существенно уменьшают температурный пограничный слой около кристалла, т.е. увеличивают градиент температуры для малых чисел Прандтля. Ранее в работах [2—4] было показано, что при амплитудах  $A < 100 \mu\text{m}$  и частотах до  $f < 100$  Гц, этот эффект не проявляется для расплавов полупроводников с малыми числами Прандтля.

Данные расчеты также подтвердили предположения автора [2—4] о том, что данный эффект существует и для  $\text{Pr} = 0.01$ , но при более больших вибрационных числах Рейнольдса (частотах или амплитудах). Кроме указанных расчетов также были проведены расчеты влияния на теплоперенос и течение расплава отдельных факторов: тепловой конвекции, конвекции Марангони, вращения кристалла и поликристалла.

**Теплопроводность.** На рис. 2 представлено начальное невозмущенное поле температуры расплава кремния,  $\text{Pr} = 0.01$ . Это случай теплопроводности без вращения, без конвекции и без вибраций при наличии лучистого потока сбоку.

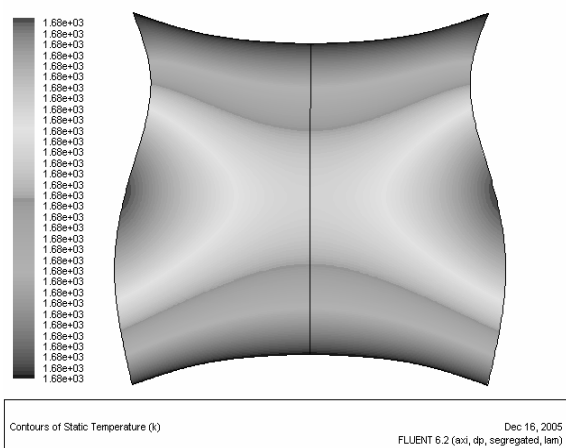


Рис. 2. Начальное поле температуры

**Гравитационная конвекция** из-за малости геометрических размеров области имеет слабую интенсивность и практически не влияет на температурное поле расплава кремния.

**Вращение.** На рис. 3 показаны функции тока: слева — при вращении нижней границы области (кристалла) со скоростью  $30 \text{rpm}$ , справа — при противовращении верхней и нижней границ со скоростью  $\pm 30 \text{rpm}$ . Поле температур в этом случае так же, как и в случае гравитационной конвекции, остается практически неизменным и выглядит, как на рис. 2.

**Конвекция Марангони.** Термокапиллярная конвекция преобладает над слабой гравитационной конвекцией, имеет сложную структуру течения и изменяет поле температуры, как показано на рис. 4.

Следует отметить, что в случае вращения, гравитационной конвекции и термокапиллярной конвекции вид поля температуры остается таким же, как на рис. 4.

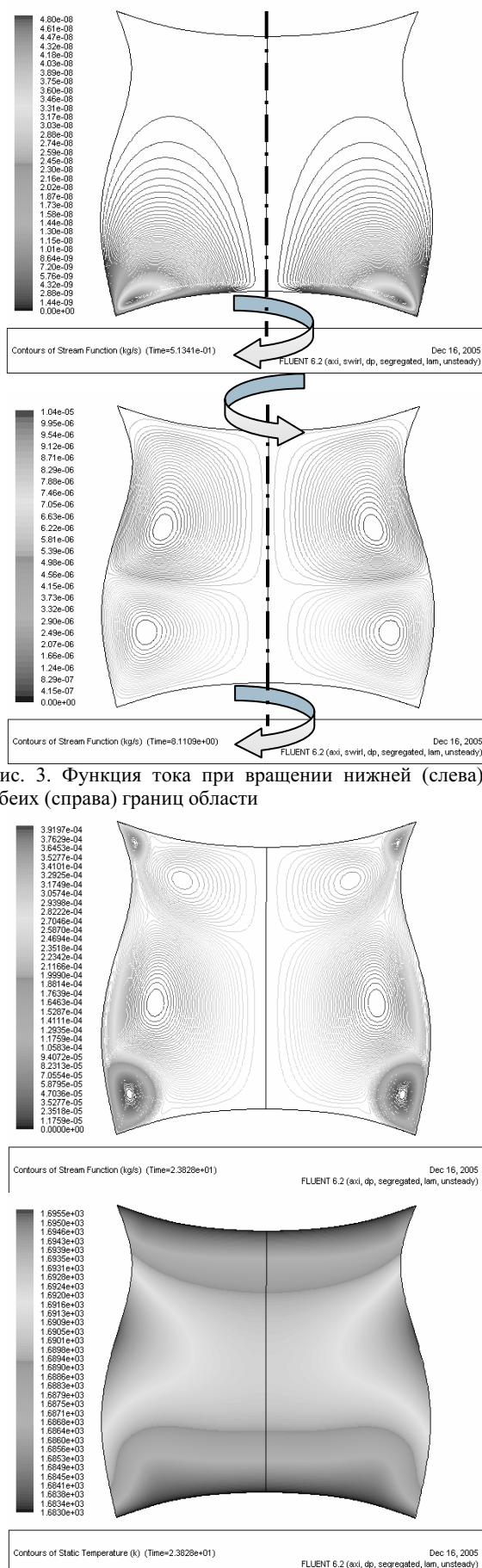


Рис. 3. Функция тока при вращении нижней (слева) и обеих (справа) границ области

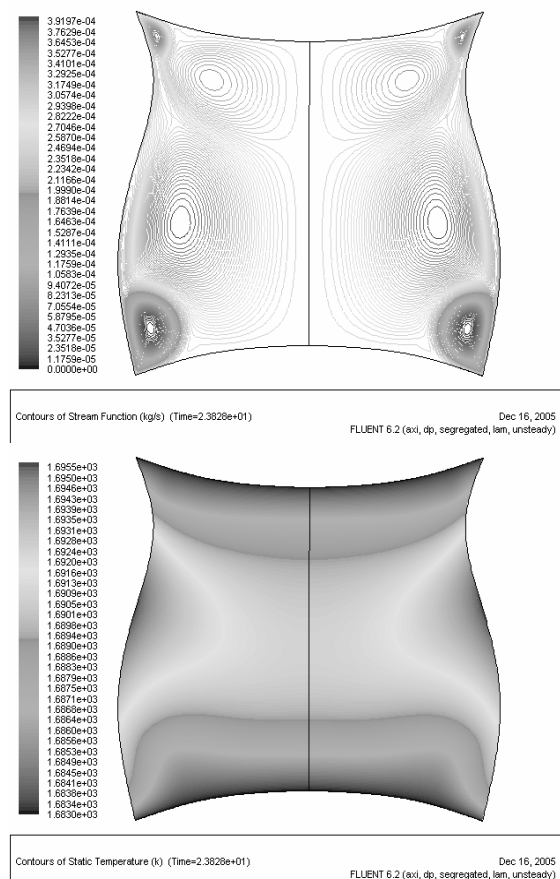


Рис. 4. Функция тока (слева) и изотермы (справа) в случае термокапиллярной конвекции

**Вибрации.** На рис. 5 показаны функция тока (слева) и изотермы (справа) в случае поступательных вибраций нижней границы (кристалла) для установившегося режима. Результаты моделирования показывают существенное изменение поля температуры и понижение среднemasсовой температуры расплава.

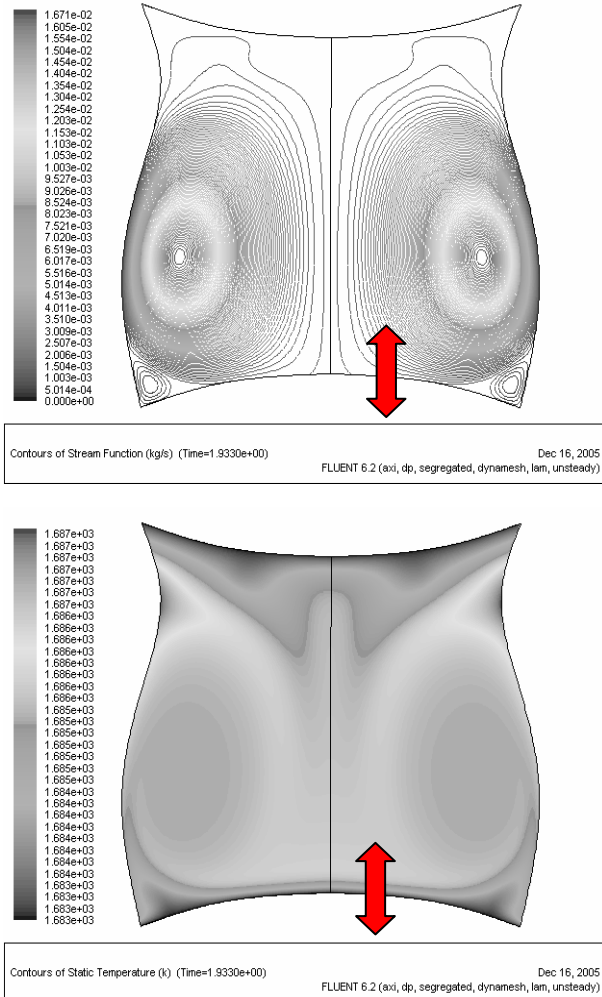


Рис. 5. Функция тока и изотермы в случае вибрации нижней границы (кристалла)

На рис. 6 показаны изолинии функции тока и изотермы для случая совместного действия тепловой, термокапиллярной конвекций, вращения и вибраций.

Анализ численных результатов показал, что при указанных выше параметрах наиболее интенсивное течение вызывается вибрацией, затем по интенсивности идут конвекция Марангони, тепловая гравитационная конвекция и вращение. Данные результаты представлены в табл. 1, где приведены максимальные значения функции тока для разных видов течения.

На рис. 7 представлены профили температуры в вертикальном сечении ( $r = 0.005$  м) для двух случаев: 1 — термокапиллярная и гравитационная конвекция, 2 — вибрации с вращением, с термокапиллярной и гравитационной конвекциями.

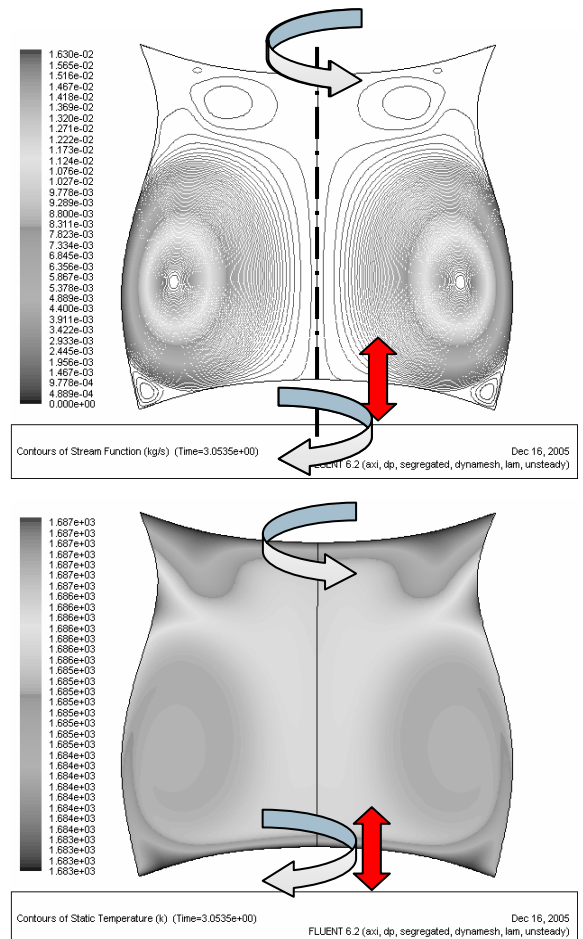


Рис. 6. Функция тока и изотермы в случае совместного действия гравитационной и термокапиллярной конвекций, вращения и вибраций нижней границы

Таблица 1. Значения функции тока и числа Нуссельта для различных видов конвекции

Тип конвекции	Максимум функции тока (грамм/сек)	Число Нуссельта Nu
Вращение	$4 \cdot 10^{-4} - 2.5 \cdot 10^{-3}$	0.42—16
Гравитационная конвекция	$3 \cdot 10^{-4}$	0.16
Конвекция Марангони	0.4	6.7
Вибрации ( $f = 3$ кГц, $A = 10$ мкм)	16	8.3

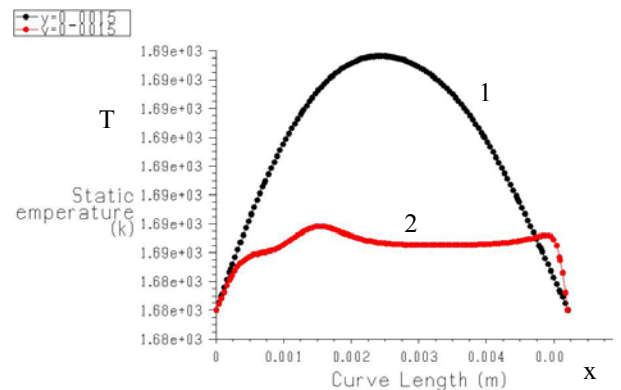


Рис. 7. Профили температуры в вертикальном сечении ( $r = 0.005$  м): 1 — термокапиллярная и гравитационная конвекция; 2 — вибрации с вращением, с термокапиллярной и гравитационной конвекциями

Данные профили показывают на то, что благодаря вибрациям температура внутри расплавленной зоны становится однородной и понижается. Структура теплового поля (рис. 6) говорит о том, что благодаря вибрациям формируются тонкие температурные пограничные слои, и для того, чтобы размеры расплавленной зоны оставались прежними, необходимо увеличивать подводимый тепловой поток извне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ численных результатов показал, что высокочастотные вибрации с малыми амплитудами могут быть доминирующим источником перемешивания расплава по сравнению с существующими конвективными течениями

Математическое моделирование показало, что вибрации могут уменьшать температурный пограничный слой и, как следствие, увеличивать температурный градиент на фронте кристаллизации. Это может интенсифицировать теплообмен на фронте кристаллизации и скорость роста кристаллов.

Расчеты показали, что при существенном влиянии вибраций на пограничные слои они могут практически не влиять на изменения температурного поля в течение периода колебаний вибратора (кристалла). Для установившегося квазистационарного режима показано, что максимальные изменения температуры в течение одного периода колебаний кристалла незначительны, таким образом, можно ожидать, что данные вибрационные воздействия не окажут негативного влияния на качество растущих кристаллов.

Данная работа была поддержана следующими грантами: РФФИ-ГФЕН № 04-01-39021 и РФФИ № 05-08-50162.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$R$  — радиус зоны, м;  
 $H$  — высота зоны, м;  
 $x, r$  — координаты, м;  
 $t$  — время, с;  
 $f$  — частота вибраций, Гц;  
 $A$  — амплитуда вибраций,  $\mu\text{м}$ ;  
 $T_{\text{кр}}$  — температура кристаллизации, К;  
 $T_{\text{ср}}$  — средняя температура, К;  
 $T_w$  — температура стенки, К;  
 $\nu$  — вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $a$  — температуропроводность,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $\text{Pr}$  — число Прандтля,  $\text{Pr} = \nu/a$ ;  
 $\text{Nu}$  — среднее число Нуссельта на фронте кристаллизации  $\text{Nu} = qR/k(T_w - T_{\text{ср}})$ ;  
 $q$  — поток тепла на фронте кристаллизации,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  
 $k$  — коэффициент теплопроводности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Математическое** моделирование конвективного тепло и массообмена на основе уравнений Навье-Стокса / В.И. Полежаев и др. М.: Наука, 1987.
2. **Федюшкин А.И., Бурого Н.Г., Полежаев В.И., Жариков Е.В.** Влияние вибраций на гидродинамику и теплообмен в расплаве при выращивании кристаллов методом Бриджмена // Сб. трудов VII Российского симпозиума "Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем". М.: ИПМ РАН, 2001. С. 365—392.
3. **Fedyushkin A.** The gravitation, rotation and vibration — controlling factors of the convection and heat — mass transfer // Proc. of 4th ICCHMT, Paris, FRANCE, 2005.
4. **Fedyushkin A., Bourago N., Polezhaev V., Zharikov E.** The influence of vibration on hydrodynamics and heat-mass transfer during crystal growth // J. Crystal Growth. 2005. V. 275. P. e1557—e1563.
5. **Manual of FLUENT 6.2.** // User's Guides, Fluent.Inc. 2005. Vol. 1, 2, 3.