

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ КОНЦЕНТРАЦИОННОГО РАССЛОЕНИЯ В ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕМАХ

В. И. ПОЛЕЖАЕВ, А. И. ФЕДЮШКИН

(Москва)

Известно, что тепловая конвекция в замкнутых объемах при заданном подводе тепла извне, с одной стороны, приводит к отводу тепла от нагреваемых поверхностей, а с другой стороны, к перераспределению температуры — температурному расслоению (стратификации). В работах [1-3] показано, что при некоторых значениях основного критерия, определяющего интенсивность конвекции — числа Рэлея, температурное расслоение может достигать максимального значения.

Подобие полей температуры и концентрации при равенстве чисел Прандтля и Шмидта и при подобных граничных условиях позволяет, по крайней мере в принципе, ожидать также наличия эффекта максимума неравномерного распределения примеси (т. е. концентрационного расслоения) в замкнутых объемах, содержащих неравномерно нагретые смеси жидкости (газы) в поле силы тяжести. Однако систематические данные о величине неоднородностей распределения концентрации в этих условиях отсутствуют. Так как в приложениях, как правило, числа Прандтля и Шмидта различаются, граничные условия по температуре и концентрации неоднородны, а режим перемешивания связан с совместным действием тепловой и концентрационной конвекции, то этот вопрос требует специального исследования.

В данной работе для исследования эффектов концентрационного расслоения применяются методы численного моделирования. Используется методика, изложенная в [4], и техника параметрических исследований, развитая в [1-3].

Показано наличие эффекта максимума концентрационного расслоения в замкнутой плоской области при определенном числе Рэлея и получены данные о его величине для различных веществ в зависимости от чисел Прандтля и Шмидта, а также при различных отношениях сторон и ориентации области по отношению к направлению силы тяжести. Полученные количественные данные позволяют, в частности, объяснить некоторые явления макросегрегации в условиях невесомости [5-7].

1. Математическая модель. Рассматривается простейшая модель для анализа распределения примеси в расплавах при направленной кристаллизации в ампуле, которая находится в поле массовых сил с равнодействующей, постоянной во времени и направленной под некоторым углом φ к оси y (фиг. 1). Предполагается, что скорость движения фронта кристаллизации намного меньше скорости установления стационарного конвективного движения, поэтому фронт кристаллизации будем считать неподвижным. При кристаллизации расплава на фронте кристаллизации происходит захват или отторжение примеси [8], что моделируется граничными условиями первого рода для концентрации.

Для составляющих скорости на всех границах ставятся условия прилипания; в начальный момент времени жидкость предполагается неподвижной и имеющей однородное распределение примеси.

Влияние конвекции, вызванной градиентами температуры и концентрации, на распределение примеси рассматривается на основе уравнений конвекции в приближении Буссинеска [9], которые для несжимаемой жидкости в переменных вихрь ω , функция тока ψ , температура θ , концентрация c в декартовой системе координат запишем в следующем безразмер-

ном виде:

$$(1.1) \quad \omega_i + u\omega_x + v\omega_y = \omega_{xx} + \omega_{yy} + (Gr \theta_x + Gr_D c_x) \sin \varphi + (Gr \theta_y + Gr_D c_y) \cos \varphi$$

$$(1.2) \quad \omega = \psi_{xx} + \psi_{yy}$$

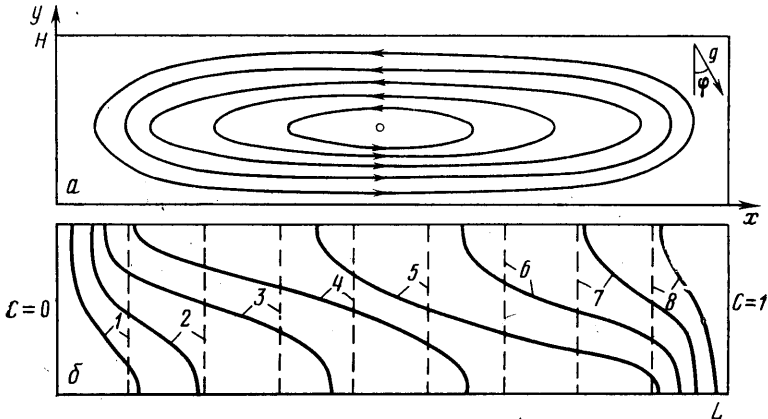
$$(1.3) \quad \theta_i + u\theta_x + v\theta_y = \frac{1}{Pr} (\theta_{xx} + \theta_{yy})$$

$$(1.4) \quad c_i + uc_x + vc_y = \frac{1}{Sc} (c_{xx} + c_{yy})$$

$$u = \psi_y, \quad v = -\psi_x, \quad \theta = \frac{T - T_s}{\Delta T}, \quad c = \frac{c^+ - c_s}{c_L - c_s}$$

$$Gr = \frac{g\beta_\tau H^3 \Delta T}{\nu^2}, \quad Gr_D = \frac{g\beta_c H^3 (c_L - c_s)}{\nu^2}$$

Здесь Gr — число Грасгофа; Gr_D — диффузионное число Грасгофа; $Pr = \nu/a$ — число Прандтля; $Sc = \nu/D$ — число Шмидта; ν — коэффициент ки-



Фиг. 1

нематической вязкости; a — коэффициент температуропроводности; D — коэффициент диффузии; β_τ , β_c — коэффициенты температурного и концентрационного расширения соответственно; c^+ — размерная концентрация примеси; c_s , c_L — концентрация примеси в твердой и жидкой фазах соответственно; T_s — температура кристаллизации; $\gamma = \partial T / \partial x = \text{const}$ — продольный градиент температуры; H , L — ширина и длина рассматриваемой области.

В качестве масштабов длины, времени, скорости, температуры и концентрации выбраны соответственно H , H^2/ν , ν/H , $\Delta T = \gamma L$ и $c_L - c_s$.

На всех границах ампулы заданы условия прилипания $\psi = 0$, $\partial\psi/\partial n = 0$ (n — нормаль к границе). По температуре и концентрации граничные условия будут иметь следующий вид:

$$x=0 \quad 0 \leq y \leq 1 \quad \theta=0, \quad c=0$$

$$(1.5) \quad x = \frac{L}{H} \quad 0 \leq y \leq 1 \quad \theta=1, \quad c=1$$

$$0 < x < \frac{L}{H} \quad y=0, \quad y=1 \quad \theta=Bx, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0, \quad B = \frac{\gamma H}{\Delta T}$$

Здесь B — безразмерный градиент температуры.
Начальные условия следующие:

$$(1.6) \quad \psi=0, \omega=0, \theta=Bx, c=1$$

Безразмерное поле концентрации в рамках сформулированной задачи зависит от координат, направления массовой силы и значений безразмерных критериев подобия, что функционально можно записать в виде

$$(1.7) \quad c=f(x, y, Pr, Sc, Ra, Ra_D, Fo_D, L/H, \varphi, B)$$

Здесь $Ra=Pr Gr$ — число Рэлея и $Ra_D=Sc Gr_D$ — диффузионное число Рэлея определяют интенсивность конвективных движений, $Fo_D=DtH^{-2}$ — диффузионное число Фурье.

Соотношение (1.7) является основной функциональной зависимостью как физического, так и математического моделирования, и равенство безразмерных аргументов в правой части в модели и в натуре является необходимым и достаточным условием для моделирования физического процесса в рамках поставленной задачи.

Отметим, что в том случае, когда диффузионный поток зависит только от градиента концентрации, влияние конвекции на распределение примесей возможно лишь при наличии диффузионного потока через границу замкнутой области. Это значит, что эффекты макросегрегации, вызываемые конвекцией, должны проявляться лишь в период, последующий за началом кристаллизации. В случае, когда учитываются эффекты термодиффузии (или бародиффузии), влияние конвекции в неизотермической системе возможно и при отсутствии диффузионного потока через границу, т. е. в период, предшествующий кристаллизации. Эти эффекты сравнительно легко включить в расчетную схему, но здесь они не рассматриваются.

Целью исследования будет определение влияния конвекции на неравномерность распределения примеси, в частности поперек ампулы. В качестве основной характеристики в дальнейшем будет рассматриваться локальная поперечная разность безразмерной концентрации: $\Delta c=c(y=0) - c(y=H)$ и аналогичная, но осредненная по длине

$$\langle \Delta c \rangle = \frac{1}{L} \int_0^L \Delta c dx$$

Диапазону чисел Рэлея $0 < Ra \leq 10^6$ соответствуют для полупроводниковых материалов при $H=1$ см, $\Delta T=100^\circ$ С относительные величины ускорения $0 < g/g_0 \leq 1$ (где g_0 — ускорение силы тяжести Земли). Рассматриваемый диапазон отношений g/g_0 включает условия, реализуемые на орбитальных станциях и установках, имитирующих невесомость. Условия, соответствующие значению $Ra=Ra_D=0$, будем называть «теоретической невесомостью»; в этом случае массовая сила строго равна нулю, конвекция отсутствует, распределение примеси происходит только благодаря диффузии.

Рассматриваемый диапазон чисел Прандтля $10^{-3} \leq Pr \leq 10^3$ и Шмидта $10^{-3} < Sc < 10^3$ включает широкий класс веществ, в том числе наиболее известные полупроводниковые материалы в расплавленном состоянии.

Для решения задачи (1.1)–(1.5) применяется метод сеток. Система разностных уравнений для (1.1)–(1.4) решается методом переменных направлений с использованием монотонной аппроксимации [10]. Граничные условия для функции тока и вихря аппроксимировались по методу, изложенному в [4]. В расчетах использована равномерная сетка.

Для выяснения сеточных погрешностей проведены методические расчеты при значениях $Ra=10^3$, $Pr=0,016$, $Sc=10$, $L/H=1$ на сетках 11×11 , 21×21 и 41×41 . Результаты расчетов показывают, что стационарные поля температур отличаются в третьем знаке после запятой; хотя поля концентрации могут различаться в отдельных точках до 20%, основная характеристика — безразмерная средняя разность концентрации $\langle \Delta c \rangle$ изменяется не больше чем на 1%.

2. Локальные и интегральные закономерности распределения примеси. Эффект максимума концентрационного расслоения. Рассмотрим влияние интенсивности конвекции (числа Рэлея) на распределение примеси при следующих значениях параметров

$$(2.1) \quad Pr=0.016, \quad Sc=10, \quad L/H=4, \quad \varphi=0, \quad B=0.25$$

Это соответствует, в частности, жидкому германию, легированному примесью, при массовой силе, направленной перпендикулярно оси ампулы. При этих параметрах в диапазоне чисел Рэлея $0 < Ra < 10^6$ наблюдается ламинарное движение. Распределение примеси в основном исследуется на стационарном режиме, за исключением особых оговорок. В условиях теоретической невесомости распределение примеси обусловлено только молекулярной диффузией, поэтому величины $\langle \Delta c \rangle = 0$ и $\Delta c = 0$.

На фиг. 1, а показана структура стационарного конвективного движения жидкости, а на фиг. 1, б сплошными линиями (кривые 1–8) показаны линии равной концентрации ($c=0.11, 0.22, 0.33, 0.44, 0.56, 0.67, 0.78, 0.89$) и пунктирными (кривые 1–8) — изотермы ($\theta=0.11, 0.22, 0.33, 0.44, 0.56, 0.67, 0.78, 0.89$) при $Ra=10$ и параметрах (2.1). Влияние слабой конвекции на распределение примеси в германии сказывается уже при $Ra=10$ (что соответствует при $H=1$ см и $\Delta T=100^\circ$ С отношению $g/g_0 \approx 10^{-4}$). Наблюдается одновихревое конвективное движение (фиг. 1, а), которое при малом числе Прандтля не влияет на поле температуры, но сказывается на поле концентрации (фиг. 1, б), так как число Шмидта сравнительно велико, что характерно для большинства полупроводниковых материалов. Влияние слабой конвекции связано с перераспределением концентрации (верхняя часть ампулы обогащается легкой компонентой).

Зависимость средней по длине безразмерной радиальной разности концентрации $\langle \Delta c \rangle$ от числа Рэлея при параметрах (2.1) дана на фиг. 2. Кривой 1 изображена зависимость $\langle \Delta c(Ra) \rangle$ при действии только тепловой конвекции; кривой 2 — зависимость $\langle \Delta c(Ra_D) \rangle$ в изотермическом случае, т. е. когда присутствует только конвекция, вызванная градиентом концентрации; кривой 3 — зависимость $\langle \Delta c(Ra, Ra_D) \rangle$ при совместном действии тепловой и концентрационной конвекций и кривой 4 дана зависимость $\langle \Delta c(Ra, Ra_D) \rangle$ в момент времени, когда $\langle \Delta c \rangle$ — максимально. Эти результаты показывают весьма существенное перераспределение концентрации, достигающее максимума при определенном числе Рэлея $Ra = Ra_m$.

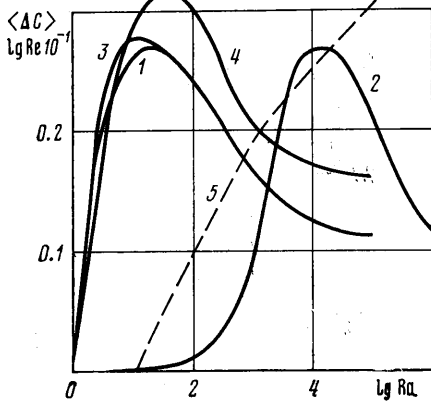
Причина этого эффекта, вытекающая из анализа структуры конвекции, полей температуры и концентрации, состоит в том, что при слабой конвекции тенденция к расслоению (сегрегации) преобладает над тенденцией к перемешиванию. Характерными особенностями структуры конвекции при $Ra > Ra_m$ является образование тонких пристеночных диффузионных пограничных слоев, что является следствием развития движения, при котором перемешивание преобладает над концентрационным расслоением и величина $\langle \Delta c \rangle$ уменьшается.

На фиг. 2 кривой 5 изображена зависимость числа Рейнольдса $Re = u_m H / \nu$, вычисленного на стационарном режиме по максимальной ско-

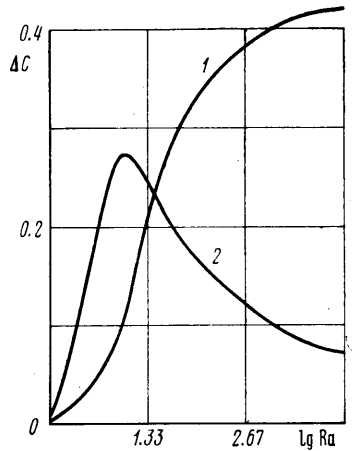
рости u_m , от числа Рэлея при параметрах (2.1), откуда видно, что интенсивность конвективного движения увеличивается монотонно.

Для германия с примесью кремния при действии только тепловой конвекции максимальное значение радиальной неоднородности концентрации примеси $\langle \Delta c \rangle \approx 0.27$ достигается приблизительно при числе Рэлея $Ra_m \approx 30$ (фиг. 2, кривая 1).

В изотермическом случае движение жидкости, вызванное концентрационной конвекцией, также приводит к неравномерному распределению концентрации по радиусу ампулы и, так же как и при действии только тепловой конвекции, существует максимум радиального расслоения кон-



Фиг. 2



Фиг. 3

центрации в зависимости от диффузионного числа Рэлея. Для германия (2.1) зависимость $\langle \Delta c(Ra_D) \rangle$ достигает максимального значения при $Ra_D \approx 6 \cdot 10^4$ (фиг. 2, кривая 2). Следует заметить, что при $Ra_D = 6 \cdot 10^6$ при установившемся в среднем движении жидкости наблюдаются слабые периодические колебания во времени максимальной функции тока и разности концентрации.

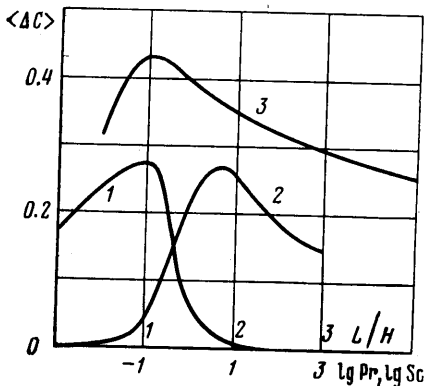
При совместном действии тепловой и концентрационной конвекции для расплавов полупроводниковых материалов тепловая конвекция подавляет действие концентрационной конвекции, хотя вклад одной концентрационной конвекции в распределение примеси существен. Так, например, для германия зависимости $\langle \Delta c(Ra) \rangle$ и $\langle \Delta c(Ra, Ra_D) \rangle$ почти на всем участке числа Рэлея совпадают (фиг. 2, кривые 1 и 3 соответственно).

В нестационарном случае максимум концентрационного расслоения, вообще говоря, может превышать максимум расслоения при стационарном режиме. Для установления этой величины максимума концентрационного расслоения, которую назовем абсолютной величиной, необходимо рассмотреть зависимость $\langle \Delta c(Ra) \rangle$ во времени для разных чисел Рэлея. Получено, что и в этом случае при каждом числе Рэлея зависимость $\langle \Delta c \rangle$ во времени имеет максимум, что дает возможность определить абсолютную величину концентрационного расслоения для различных чисел Рэлея. Эта зависимость для германия (2.1) при совместном действии тепловой и концентрационной конвекции показана на фиг. 2 кривой 4.

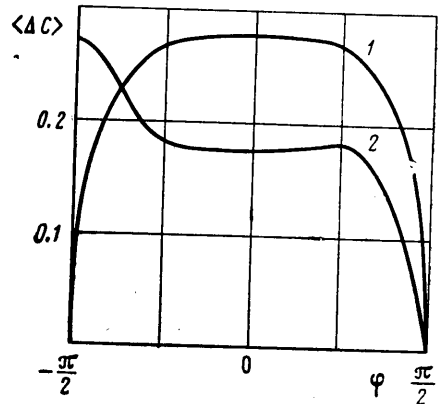
Следует отметить, что радиальная неоднородность концентрации Δc для определенного поперечного сечения может быть гораздо больше (или меньше) осредненной по длине радиальной разности концентрации $\langle \Delta c \rangle$, что зависит от числа Рэлея и сечения, в котором рассматривается эта ве-

личина. Зависимость $\Delta c(Ra)$ для двух поперечных сечений представлена на фиг. 3 кривая 1 — $x=0.1$, кривая 2 — 2. Она имеет максимум в каждом сечении при своем числе Рэлея, в общем случае отличающемся от числа Рэлея, при котором имеет место максимум средней величины радиального расслоения концентрации.

Из приведенных выше данных видно, что эффект максимума концентрационного расслоения вызывается как тепловой, так и концентрационной конвекцией или их суперпозицией в стационарных или нестационарных условиях. Приведенные данные свидетельствуют также о том, что



Фиг. 4



Фиг. 5

конкретные значения чисел Рэлея, при которых имеет место максимум концентрационного расслоения, существенно зависят от числовых значений параметров, входящих в правую часть выражения (1.7), и отличаются от тех значений, при которых имеет место максимум температурного расслоения. В частности, в работах [1-3] максимум температурного расслоения наблюдался при числе Рэлея, отнесенном к потоку тепла, порядка 10^5 , в то время как максимум концентрационного расслоения при параметрах (2.1) наблюдается при $Ra_m \approx 30$.

3. Концентрационное расслоение в веществах с различными числами Прандтля и Шмидта. Конкретное значение числа Рэлея, соответствующее максимуму концентрационного расслоения, зависит от свойств вещества.

На фиг. 4 представлены зависимости концентрационного расслоения от числа Прандтля $\langle \Delta c(Pr) \rangle$ (кривая 1) и от числа Шмидта $\langle \Delta c(Sc) \rangle$ (кривая 2) при $Ra=100$, $Ra_b=0$ и параметрах (2.1). В диапазоне чисел Прандтля от 10^{-3} до 10^3 также установлен максимум для зависимости $\langle \Delta c(Pr) \rangle$ при значении $Pr \approx 0.1$ (фиг. 4, кривая 1). Характерно, что наибольшее влияние конвекции на радиальную неоднородность концентрации наблюдается при $Pr < 1$, что соответствует жидким металлам, в частности полупроводниковым металлам; при $Pr \gg 1$ влияние конвекции на распределение примеси незначительное или может совсем не сказываться. В том же диапазоне чисел Шмидта зависимость $\langle \Delta c(Sc) \rangle$ имеет максимум приблизительно при $Sc \approx 10$ (фиг. 2, кривая 2), т. е. наибольшее влияние конвекции на радиальное расслоение концентрации примеси приходится на материалы с числами Шмидта, соответствующими полупроводниковым материалам, таким, как жидкий германий, антимонид индия, арсенид галлия и др.

4. Влияние на концентрационное расслоение геометрии и ориентации массовой силы. Результаты серии расчетов для прямоугольных областей с отношением сторон L/H от 0.5 до 4 показывают, что при $Ra=100$ и параметрах (2.1) зависимость $\langle \Delta c(L/H) \rangle$ имеет максимум при $L/H \approx 1$ и монотонно уменьшается при уменьшении и увеличении длины ампулы (фиг. 4, кривая 3), т. е. при постоянном диаметре ампулы макросегрегация больше в коротких ампулах и меньше в длинных. Это аналогично зависимости от отношения сторон теплопередачи в замкнутой области, подогреваемой сбоку (согласно [11], средняя теплопередача имеет максимальное значение при $H/L=1.5$), и объясняется взаимодействием пограничных слоев, образующихся на стенках.

Для исследования влияния ориентации массовой силы на распределение примеси проведены расчеты при углах наклона массовой силы от $\varphi = -\pi/2$ до $\varphi = \pi/2$ при $Ra=10^2$ и 10^4 (фиг. 5, кривые 1 и 2 соответственно). В этом диапазоне φ случаю $\varphi = -\pi/2$ соответствует подогрев снизу, когда возможно возникновение конвекции при потере устойчивости, случаю $\varphi = \pi/2$ соответствует абсолютно устойчивое равновесие, когда конвекция отсутствует, а в остальных случаях конвекция возникает всегда, так как гидростатического равновесия нет. Критическое число Рэлея для данной геометрии в случае $\varphi = -\pi/2$ равно $Ra^+ \approx 1559$ [12].

Наибольшее значение $\langle \Delta c(\varphi) \rangle$ при малых числах $Ra < Ra^+$ достигается при $\varphi = 0$, что соответствует направлению массовой силы, перпендикулярному оси ампулы (фиг. 5, кривая 1). При таких числах Рэлея не происходит потери устойчивости равновесия, поэтому, так же, как и в устойчивом положении ($\varphi = \pi/2$), величина $\langle \Delta c \rangle = 0$.

При числе Рэлея $Ra=10^4$ в случае $\varphi = -\pi/2$ уже имеет место конвективное движение и именно этому направлению массовой силы соответствует максимальная величина концентрационного расслоения примеси (фиг. 5, кривая 2), при этом характер зависимости $\langle \Delta c(\varphi) \rangle$ иной, чем при $Ra=100$. Эти результаты показывают, что влияние ориентации массовой силы на расслоение примеси в ампуле существенно, причем его оценку следует проводить с учетом величины числа Рэлея.

5. Анализ эффектов макросегрегации примеси в условиях невесомости. Изучение влияния конвекции на распределение пассивной примеси, являющееся общей задачей гидромеханики, приобретает в последнее время особую актуальность в технологических процессах выращивания технически ценных полупроводниковых монокристаллов. Конвективные движения, возникающие в расплавленных полупроводниках в поле силы тяжести (тепловая, концентрационная конвекция), обычно приводят к так называемой макросегрегации примесей, т. е. к их неравномерному распределению в «малом», из-за мелкомасштабных пульсаций гидродинамических, тепловых и концентрационных полей, следствием чего являются такие дефекты тонкой структуры, как полосчатая неоднородность (см., например, [8]). Одной из возможностей избавиться от этих дефектов является подавление конвекции за счет уменьшения силы тяжести, что может осуществляться, например, в невесомости.

К настоящему времени выполнен ряд таких экспериментов (например, в полетах космических станций Скайлэб, Союз — Аполлон [5-7, 13]), результаты которых, однако, противоречивы, так как если в одних случаях в действительности удалось избавиться от полосчатой неоднородности и улучшить характеристики полупроводниковых материалов [13], то в других при отсутствии полосчатой неоднородности наблюдалось неоднородное распределение примеси по диаметру образцов, или макросегрегация [5-7], которая (как отмечается, в частности, в [6, 7]) могла быть больше, чем в аналогичных экспериментах, выполненных в земных условиях.

В работах [6, 7] в качестве основной причины этого явления указывается на явление бародиффузии, однако при этом влияние конвекции не учитывалось.

В упоминавшемся выше технологическом эксперименте, проведенном по программе Союз — Аполлон Институтом металлургии АН СССР (эксперимент МА-150) [7], рассматривалась возможность получения монокристаллов твердых растворов германий — кремний — сурьма с равномерным распределением примеси методом направленной кристаллизации. Длина слитка 38 мм, диаметр 9.3 мм. Температурный градиент в печи равен приблизительно 25 град/см. Орбитальная станция имела вращение

вокруг главной оси, в связи с чем вектор ускорения был направлен перпендикулярно оси ампулы и величина ускорения в среднем была равна $4 \cdot 10^{-3} g_0$.

В соответствии с результатами эксперимента [7] неравномерность распределения примесей в радиальном направлении в условиях невесомости существенно больше, чем в кристаллах, выращенных в таких же условиях на Земле, хотя до проведения эксперимента ожидался обратный эффект. Неравномерное распределение примеси наблюдалось и в другом технологическом эксперименте МА-060 [5], где происходила кристаллизация германия, легированного галием.

Макросегрегация на Земле может быть меньше, чем в условиях невесомости, что является следствием эффекта максимума концентрационного расслоения. Из зависимости $(\Delta c(Ra))$, изображенной на фиг. 2, видно, в частности, что на Земле, т. е. при $g/g_0=1$ (для эксперимента МА-150 $Ra \approx 10^5$), концентрационная неоднородность меньше, чем в условиях невесомости при $g/g_0=10^{-3}$, $Ra \approx 10^2$.

По результатам расчетов (фиг. 2) в условиях технологического эксперимента МА-150 (Союз—Аполлон) величина макросегрегации, вызываемой суперпозицией тепловой и концентрационной конвекции, составляет при $Ra=100$ около 27%. При этом величина радиальной макросегрегации в условиях эксперимента выше, чем в Земных условиях, что соответствует результатам измерений, опубликованным в [7].

Авторы благодарят В. Л. Грязнова, С. А. Никитина, К. Г. Дубовика за помощь в использовании комплекса программ и полезные обсуждения и И. Н. Белокурова за консультации по результатам технологических экспериментов.

Поступила 7 VI 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Полежаев В. И. Нестационарная ламинарная тепловая конвекция в замкнутой области при заданном потоке тепла. Изв. АН СССР, МЖГ, 1970, № 4.
2. Полежаев В. И., Вальциферов Ю. В. Численное исследование нестационарной тепловой конвекции в цилиндрическом сосуде при боковом подводе тепла. В сб.: Некоторые применения метода сеток в газовой динамике, вып. 3. М., Изд-во Моск. ун-та, 1971.
3. Полежаев В. И. Эффект максимума температурного расслоения и его приложения. Докл. АН СССР, 1974, т. 218, № 4.
4. Грязнов В. Л., Полежаев В. И. Численное решение нестационарных уравнений Навье—Стокса для турбулентного режима естественной конвекции. Ин-т проблем мех. АН СССР. Препринт № 81, М., 1977.
5. Gatos H. C., Witt A. F., Lichtensteiger M., Herman C. J. Interface marking in cristal (МА-060) Apollo-Soyuz. Test Project: summary seince report, vol. 1, p. 429, NASA SP-412, 1977.
6. Земсков В. С. Сегрегация компонентов сплавов, обусловленная явлением барометрической молекулярной диффузии в потенциальных полях гравитационных и центробежных сил. Докл. АН СССР, 1977, т. 233, № 2.
7. Земсков В. С., Титков А. Н., Белокурова И. Н., Шульпина И. Л., Сафаров В. И., Кузовый П. И. Особенности распределения кремния и сурьмы в кристаллах твердых растворов германий—кремний—сурьма, полученных в эксперименте «Универсальная печь» по программе «Союз-Аполлон». Физика и химия обработки материалов, 1977, № 5.
8. Лодиз Р. А., Паркер Р. Л. Рост монокристаллов. М., «Мир», 1974.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М., Гостехиздат, 1953.
10. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. М., «Наука», 1977.
11. Полежаев В. И. Течение и теплопередача при ламинарной естественной конвекции в вертикальном слое. В сб.: Тепло- и массоперенос, т. 1. М., «Энергия», 1968.
12. Гершуни Г. З., Жуговицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М., «Наука», 1972.
13. Processing and Manufacturing in Space. Proceeding of a Symposium held at Frascaty, Italy, 1974.