

01; 06

© 1990 г

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНЫХ ГАЗОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ РЕАКТОРАХ

### II. УПРАВЛЕНИЕ СОСТАВОМ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $\text{AlGaAs}$ В ПЕРЕХОДНЫХ ОБЛАСТЯХ

*А. И. Жмакин, Ю. Н. Макаров*

Рассмотрено математическое моделирование процессов выращивания структур  $\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с использованием металлоорганических соединений в диффузионном режиме. Рассмотрены как прямая, так и обратная задачи, т. е. определение временных зависимостей концентраций реагентов на входе в реактор, обеспечивающих получение структур с заданным изменением состава в переходных областях. Приведены примеры расчетов выращивания слоев с линейным и параболическим профилями состава.

#### Введение

Для изготовления ряда полупроводниковых приборов, таких как лазеры с квантовой ямой [1], гетероструктурные биполярные транзисторы [2-4] и селективно легированные полевые транзисторы [5], необходимы структуры  $\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с заданным профилем изменения состава твердого раствора в переходных областях. Газофазная эпитаксия с использованием металлоорганических соединений, проводимая в диффузионном режиме [6], позволяет получать такие структуры путем управления подачей активных реагентов на вход эпитаксиального реактора. В работе [7] рассмотрены основные вопросы моделирования газодинамических процессов и массопереноса в реакторе на примере роста эпитаксиальных слоев  $\text{GaAs}$  из смеси триметилгаллий (ТМГ)—арсин—водород. Возможность достоверного описания нестационарного массопереноса показана сравнением результатов расчетов с экспериментальными данными в [8]. Модель роста твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  из смеси ТМГ—триметилалюминий (ТМА)—арсин—водород предложена и экспериментально подтверждена в работе [9]. В настоящей статье на основе этой модели рассматривается численное определение временных зависимостей концентраций активных реагентов на входе в эпитаксиальный реактор, обеспечивающих выращивание структур  $\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с заданным изменением состава твердого раствора в переходных областях.

#### 1. Функции отклика

Модель процессов роста эпитаксиальных слоев твердых растворов  $\text{AlGaAs}$  основывается на следующих предположениях [9]: 1) пиролиз ТМГ и ТМА происходит независимо; 2) основными продуктами разложения этих соединений при температурах подложкодержателя  $T > 900$  К в объеме и у поверхности подложек являются  $\text{Ga}$ ,  $\text{GaAs}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{AlAs}$ ; 3) ТМА присутствует в исходной парогазовой смеси в форме димеров.

Ввиду незначительного отличия коэффициентов диффузии в водороде  $\text{Ga}$  и  $\text{GaAs}$  ( $\text{Al}$  и  $\text{AlAs}$ ) от коэффициента диффузии ТМГ (ТМА) можно не детализировать механизм пиролиза ТМГ (ТМА) и ограничиться рассмотрением массопереноса основных компонентов ТМГ и ТМА и продуктов пиролиза  $\text{Ga} + \text{GaAs}$

и Al+AlAs. Тогда для замыкания уравнений требуются лишь константы скорости разложения ТМГ и ТМА, известные из эксперимента [10].

Таким образом, уравнения нестационарного массопереноса

$$\rho \left[ \frac{\partial C_i}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) C_i \right] - \frac{1}{\text{Re Sc}_i} \nabla \cdot (\rho D \nabla C_i) + W_i \quad (1)$$

решаются для следующих компонентов: ТМГ ( $i=1$ ), Ga+GaAs ( $i=2$ ), ТМА ( $i=3$ ), Al+AlAs ( $i=4$ ). В уравнениях (1)  $C_i$  — молярная концентрация  $i$ -го компонента;  $\rho$  — плотность газа; Re — число Рейнольдса;  $\text{Sc}_i$  — число Шмидта  $i$ -го компонента;  $D = (T/T_0)^{1.65}$ ;  $W_1 = -W_2 = -K_1(T) C_1 t_0 \rho$ ,  $W_3 = -W_4 = -K_3(T) C_3 t_0 \rho$ ;  $K_1(T)$ ,  $K_3(T)$  — константы скорости разложения ТМГ и ТМА соответственно;  $t_0 = R_0/V_0$  — масштаб времени ( $R_0$  — радиус реактора,  $V_0$  — характерная скорость газа).

Необходимые поля скорости и температуры находятся из расчета стационарного течения нереагирующего газа [7]. Граничные условия для концентраций задаются следующим образом. На входе в реактор полагаются  $C_1 = C_1^0(t)$ ,  $C_2 = 0$ ,  $C_3 = C_3^0(t)$ ,  $C_4 = 0$ . На выходе ставятся «мягкие» граничные условия [11] равенства нулю производных от концентраций по продольной координате. На подложкодержателе и горячих участках стенки принимается  $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 0$ . Предполагается, что на стенках реактора осаждение отсутствует, если температура поверхности ниже температуры разложения ТМГ и ТМА [12], т. е.  $\partial C_i / \partial n = 0$ , где  $n$  — нормаль к поверхности.

Скорость роста  $V_g(t)$  и состав твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$   $x(t)$  определяются как

$$V_g(t) = \frac{\rho}{M} \left[ \frac{M_{\text{GaAs}}}{\rho_{\text{GaAs}}} J_{\text{Ga}}(t) + \frac{M_{\text{AlAs}}}{\rho_{\text{AlAs}}} J_{\text{Al}}(t) \right], \quad (2)$$

$$x(t) = \frac{J_{\text{Al}}(t)}{J_{\text{Ga}}(t) + J_{\text{Al}}(t)}, \quad (3)$$

где  $M_{\text{GaAs}}$ ,  $M_{\text{AlAs}}$ ,  $M$  — молекулярные массы GaAs, AlAs и газовой смеси соответственно;  $\rho_{\text{GaAs}}$ ,  $\rho_{\text{AlAs}}$  — плотность твердой фазы,

$$J_{\text{Ga}}(t) = -\left( D_1 \frac{\partial C_1}{\partial n} + D_2 \frac{\partial C_2}{\partial n} \right), \quad J_{\text{Al}}(t) = -\left( D_3 \frac{\partial C_3}{\partial n} + D_4 \frac{\partial C_4}{\partial n} \right)$$

— молярные диффузионные потоки, описывающие суммарный поток галлия (в виде ТМГ, Ga и GaAs) и алюминия (ТМА, Al и AlAs) к поверхности.

Заметим, что в силу близости постоянной решетки GaAs и AlAs соотношение (2) с хорошей точностью может быть записано в виде

$$V_g(t) = \frac{\rho M_{\text{GaAs}}}{\rho_{\text{GaAs}} M} (J_{\text{Ga}}(t) + J_{\text{Al}}(t)). \quad (2')$$

Введем функции отклика

$$K_{\text{Ga}}(t) = J_{\text{Ga}}(t) / \Delta C_1, \quad K_{\text{Al}}(t) = J_{\text{Al}}(t) / \Delta C_3, \quad (4)$$

описывающие соответственно диффузионный поток галлия и алюминия на подложку при ступенчатом изменении концентрации ТМГ (ТМА) на входе. Вообще говоря, эти функции могут быть определены не только из расчета нестационарного массопереноса, но и с помощью специально поставленных экспериментов.

В силу линейности уравнений массопереноса и граничных условий диффузионный поток галлия (алюминия) на подложку представляется в виде

$$J_{\text{Ga(Al)}}(t) = \sum_{i=1}^N K_{\text{GaAl}}(t - t_i) [\Delta C_{1(3)}]_i + J_{\text{Ga(Al)}}^0 \quad (5)$$

при многократном ступенчатом изменении концентрации ТМГ (ТМА) на входе в реактор (на величину  $\Delta C_i$  в момент времени  $t_i$ ) или в виде

$$J_{\text{Ga(Al)}}(t) = \int_0^t K_{\text{Ga(Al)}}(t-\tau) \frac{dC_{1(3)}^0}{dt} d\tau + J_{\text{Ga(Al)}}^0 \quad (6)$$

при непрерывном изменении концентрации:  $J_{\text{Ga}}^0$ ,  $J_{\text{Al}}^0$  — диффузионные потоки в начальный момент времени. Заметим, что представление (5) — частный случай соотношения (6) при аппроксимации  $dC_1^0/dt$ ,  $dC_3^0/dt$  кусочно-постоянными функциями. Скорость роста и состав твердого раствора при этом определяются согласно уравнениям (2', 3)

$$V_g(t) = \frac{\rho M_{\text{GaAs}}}{\rho_{\text{GaAs}} M} \left( \int_0^t K_{\text{Ga}}(t-\tau) \frac{dC_1^0}{dt} d\tau + J_{\text{Ga}}^0 + \int_0^t K_{\text{Al}}(t-\tau) \frac{dC_3^0}{dt} d\tau + J_{\text{Al}}^0 \right), \quad (7)$$

$$x(t) = \frac{\int_0^t K_{\text{Al}}(t-\tau) \frac{dC_3^0}{dt} d\tau + J_{\text{Al}}^0}{\int_0^t K_{\text{Ga}}(t-\tau) \frac{dC_1^0}{dt} d\tau + J_{\text{Ga}}^0 + \int_0^t K_{\text{Al}}(t-\tau) \frac{dC_3^0}{dt} d\tau + J_{\text{Al}}^0}. \quad (8)$$

Приведем примеры рассчитанных функций отклика. Рассмотрим вертикальный цилиндрический реактор с центральным диском-подложкодержателем

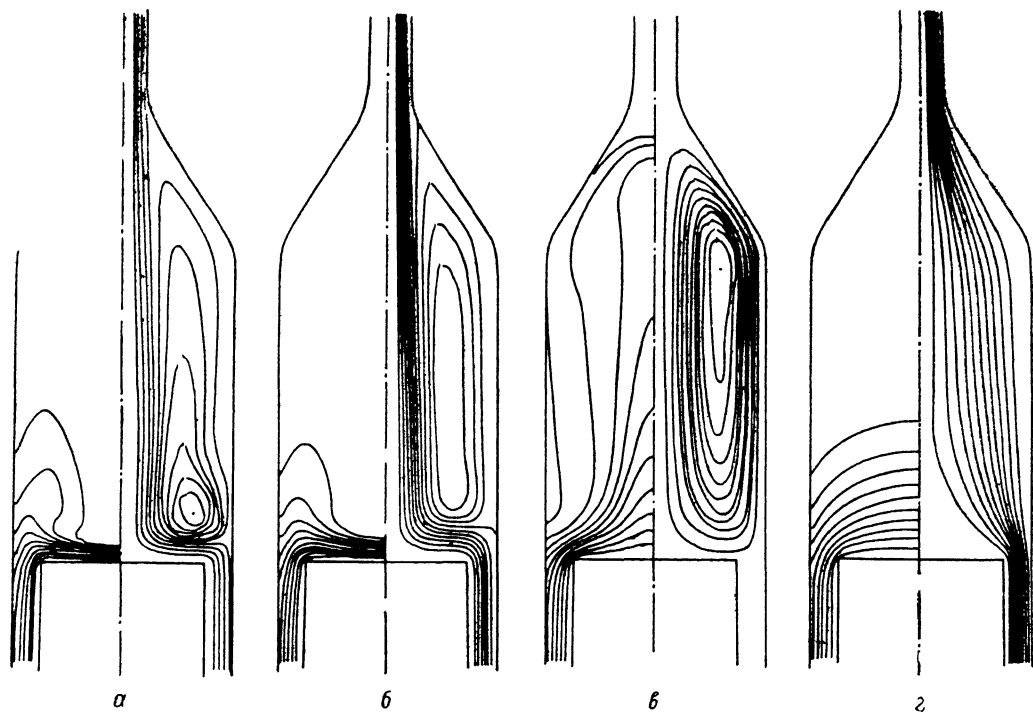


Рис. 1.

лем [8, 9, 13]. На рис. 1 приведены стационарные картины течения для следующих режимов, определяемых расходом газовой смеси  $Q$  и давлением газа в реакторе  $p$ :  $Q=6.25$  л/мин,  $p=1$  атм (а);  $Q=6.25$  л/мин,  $p=0.1$  атм (б);  $Q=1$  л/мин,  $p=1$  атм (е);  $Q=1$  л/мин,  $p=0.1$  атм (з). Показаны изолинии функции тока (справа) и изотермы (слева). На рис. 2 представлены определенные из расчета нестационарного массопереноса функции отклика галлия (сплошные линии) и алюминия (штриховые линии). Функции отклика приведены в нормализованном виде  $\bar{K}(t) = K(t)/K_\infty$ , где  $K_\infty$  — установившееся значение. Изолинии кон-

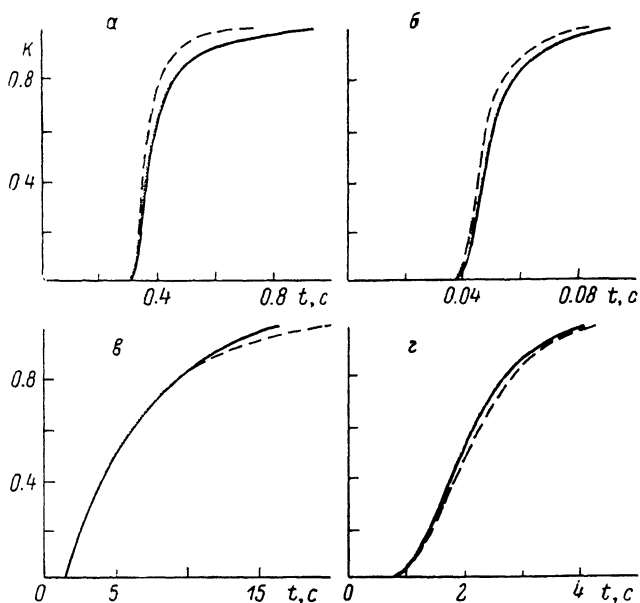


Рис. 2. Нормализованные функции отклика для режимов течения, показанных на рис. 1.

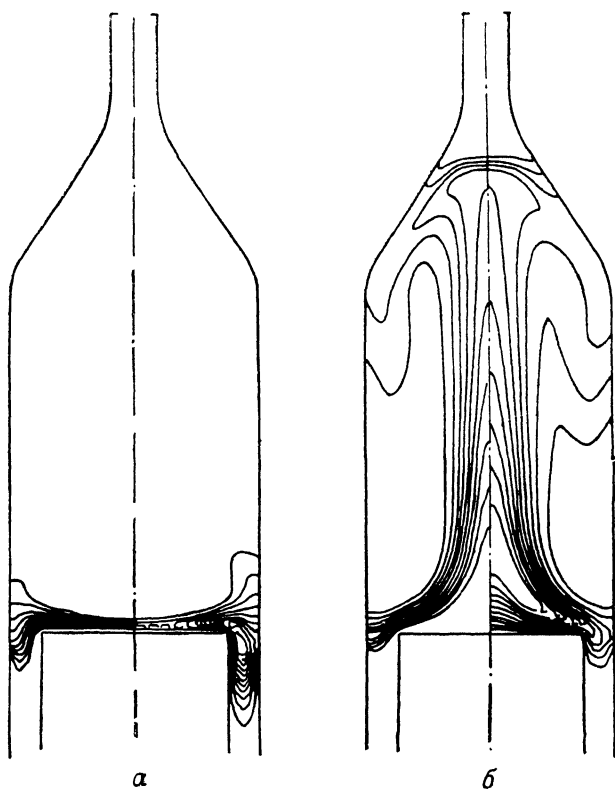


Рис. 3. Установившиеся изолинии концентрации ТМГ (слева) и продуктов пиролиза (справа).  
 $Q=6.25$  л/мин,  $p=1$  атм ( $\alpha$ );  $Q=1$  л/мин,  $p=1$  атм ( $\beta$ ).

центраций активных реагентов при стационарном массопереносе показаны на рис. 3 для режимов *a* и *b*.

Отметим особенности функций отклика, существенные с практической точки зрения. Во-первых, они являются нелинейными. Во-вторых, функции отклика галлия и алюминия не совпадают, причем величина отставания (опережения) растет с увеличением времени, а знак зависит от режима. Это свойство является следствием различия констант скоростей разложения ТМГ и ТМА и различия коэффициентов диффузии реагентов. Наконец, ширина функции отклика, определяемая как  $\tau = t_2 - t_1$ , где  $K(t_1) = \varepsilon$ ,  $K(t_2) = 1 - \varepsilon$  ( $\varepsilon \ll 1$ , обычно  $\varepsilon \sim 0.05$ ), меняется в широких пределах в зависимости от структуры течения (для приведенных режимов более чем на два порядка).

## 2. Прямая задача

Описанные выше функции отклика являются эффективным средством исследования процессов выращивания полупроводниковых структур в случае, когда скорость роста лимитируется массопереносом реагентов к подложке. Для данного режима выращивания (расход газовой смеси, давление, характер охлаждения стенок, температура подложки) они вычисляются один раз и содержат всю необходимую информацию об особенностях массопереноса в реакторе. Моделирование выращивания структур на основе соотношений (7), (8) требует несоизмеримо меньших ресур-

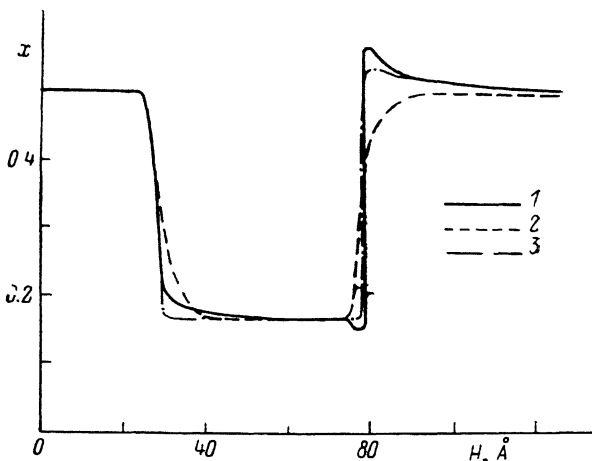


Рис. 4. Расчетный профиль состава твердого раствора.

1 — процесс с остановкой роста, 2 — без остановки роста, 3 — без остановки роста с уменьшением концентрации ТМГ на входе.

сов ЭВМ, чем расчет нестационарного массопереноса и тем более расчет течения газовой смеси [9]. Более того, как уже отмечалось, функции отклика могут быть найдены экспериментально. Уравнения (7), (8) можно использовать как для расчета зависимости состава твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  от толщины для заданных изменений концентраций реагентов на входе в реактор  $C_1^0(t)$ ,  $C_3^0(t)$  (прямая задача), так и для нахождения  $C_1^0(t)$ ,  $C_3^0(t)$ , обеспечивающих получение слоев твердого раствора с требуемым изменением состава по толщине (обратная задача).

Приведем пример решения прямой задачи. Рассматривается рост двойной гетероструктуры  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с  $x = x_1$  при  $H < H_1$  или  $H > H_2$  и  $x = x_2$  при  $H_1 \leq H \leq H_2$ . ТМГ и ТМА подаются в реактор следующим образом:

$$\begin{aligned}
 t < t_1 - t^0, t > t_2 + t^0: C_1^0(t) = C_1^1, C_3^0(t) = C_3^1, \\
 t_1 - t^0 \leq t < t_1, t_2 < t \leq t_2 + t^0: C_1^0(t) = C_1^2, C_3^0(t) = C_3^2, \\
 t_1 \leq t \leq t_2: C_1^0(t) = C_1^3, C_3^0(t) = C_3^3,
 \end{aligned}$$

где  $C_1^1, C_1^2, C_1^3, C_3^1, C_3^2, C_3^3$  — константы.

Рассмотрим режимы с постоянной подачей ТМГ ( $t^0 = 0, C_1^1 = C_1^2 = C_1^3$ ) и с остановкой роста ( $t^0 > 0, C_1^1 = C_1^3, C_1^2 = 0, C_3^2 = 0$ ). Соответствующие профили состава для первого (штриховая линия) и второго способов (сплошная линия) представлены на рис. 4, режим течения *a*. Видно, что ширина переходного слоя в случае остановки роста значительно меньше, однако состав твердого раствора меняется немонотонно. Последнее обстоятельство объясняется отмеченным выше несовпадением функций отклика галлия и алюминия (рис. 2, *a*): например, при

включении подачи ТМГ и ТМА диффузионный поток алюминия на подложку быстрее достигает стационарного значения, что приводит к завышению его доли в твердом растворе. Отметим, что резкий переходный слой с практически монотонным изменением состава можно получить в режиме без остановки роста ( $t^0=0$ ), резко уменьшая подачу ТМГ при  $t_1 \leq t \leq t_2$  (штрихпунктирная линия на рис. 4,  $C_1^0 \approx 0.1 C_1^1$ ).

### 3. Обратная задача

Сформулируем задачу о нахождении зависимостей концентраций активных реагентов (ТМГ, ТМА) на входе в реактор от времени, обеспечивающих выращивание переходных областей значительной протяженности с заданным изменением состава твердого раствора  $Al_xGa_{1-x}As$  по толщине  $x_0(H)$ . Рассмотрим случай постоянной скорости роста  $V_g \sim (J_{Ga}(t), J_{Al}(t)) = J_0 = \text{const}$ . Тогда  $x_0(t) = x_0(H/V_g)$  и для определения  $dC_1^0/dt$ ,  $dC_3^0/dt$  получаем интегральные уравнения первого рода

$$\int_0^t K_{Ga}(t-\tau) \frac{dC_1^0}{d\tau} d\tau = [1 - x_0(t)] J_0 - J_{Ga}^0, \quad (9a)$$

$$\int_0^t K_{Al}(t-\tau) \frac{dC_3^0}{d\tau} d\tau = x_0(t) J_0 - J_{Al}^0. \quad (9б)$$

Задача (9) является некорректно поставленной. В работе использованы известные методы регуляризации решений уравнений первого рода [14, 15]. Заметим, что аналогичная задача применительно к проблеме легирования фосфором эпитаксиальных слоев кремния рассматривалась в работах [16, 17] путем сведения ее к задаче линейно-квадратичного управления. При этом функции отклика необходимо аппроксимировать выражением вида

$$K(t) = 1 - \exp(-t/t_*) (1 + t/t_*),$$

где  $t^*$  — константа.

Очевидно, однако, что такое представление не всегда обеспечивает достаточную точность для реальных функций отклика  $K_{Ga}(t)$ ,  $K_{Al}(t)$  (рис. 2). Примененный в настоящей работе численный метод не накладывает ограничений на вид  $K_{Ga}(t)$ ,  $K_{Al}(t)$ : используется дискретное представление функций отклика, полученных при нестационарном расчете массопереноса, а для промежуточных значений времени  $t$  функции восполняются с помощью интерполяции кубическими сплайнами.

Заметим, что уравнения (9а), (9б) решаются независимо. Опуская индексы, можно записать

$$\int_0^t K(t-\tau) \frac{dC}{d\tau} d\tau = f(t), \quad (10)$$

где  $f(t) = [1 - x_0(t)] J_0 - J_{Ga}^0$  при отыскании концентрации ТМГ и  $f(t) = x_0(t) J_0 - J_{Al}^0$  в случае ТМА.

Если для диффузионных потоков используется дискретное представление (5), то уравнение (10) принимает вид

$$\sum_{i=1}^N K(t-t_i) \Delta C_i = f(t). \quad (11)$$

Ниже мы будем рассматривать уравнение (11), так как его решение может быть непосредственно использовано в автоматизированной системе для программированного роста полупроводниковых структур.

Обобщенное решение [14, 15] уравнения (11) определяется как решение, обеспечивающее наилучшее удовлетворение уравнению на интервале  $[0, t]$  в смысле метода наименьших квадратов, т. е. минимизирующее квадратичную форму

$$\Phi = \int_0^i \left[ \sum_{i=1}^N K(t-t_i) \Delta C_i - f(t) \right]^2 dt. \quad (12)$$

Для регуляризации решения к правой части (12) добавляются стабилизирующие члены вида

$$\Omega = \sum_{i=1}^N \alpha_i (\Delta C_i)^2 + \sum_{i=2}^N \beta_i (\Delta C_i - \Delta C_{i-1})^2 + \sum_{i=1}^{N-1} \gamma_i (\Delta C_{i+1} - 2\Delta C_i + \Delta C_{i-1})^2. \quad (13)$$

Задача, таким образом, сводится к решению системы  $N$  уравнений  $A\varphi = B$  относительно вектора  $\varphi = (\Delta C_1, \Delta C_2, \dots, \Delta C_N)^T$ ,

где

$$A_{ij} = \int_0^i K(t-t_i) K(t-t_j) dt + \delta_{ij}(\alpha_i + 2\beta_i + 6\gamma_i) - \\ - \delta_{i+1,j}(\beta_i + 4\gamma_i) - \delta_{i-1,j}(\beta_i + 4\gamma_i) + \delta_{i+2,j}\gamma_i + \delta_{i-2,j}\gamma_i, \\ B_i = \int_0^i K(t-t_i) f(t) dt,$$

$\delta_{i,j}$  — символ Кронекера.

Параметры регуляризации  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  нормированы следующим образом:

$$\alpha_i = \alpha Q_i, \quad \beta_i = \beta Q_i, \quad \gamma_i = \gamma Q_i,$$

где

$$Q_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N A_{ij} - A_{ii},$$

а оптимальные значения  $\alpha, \beta, \gamma$  определяются из численных экспериментов.

О качестве решения можно судить по его гладкости, характеризуемой величиной  $q = \max_i |\Delta C_i - \Delta C_{i-1}|$ . Без регуляризации решение можно получить

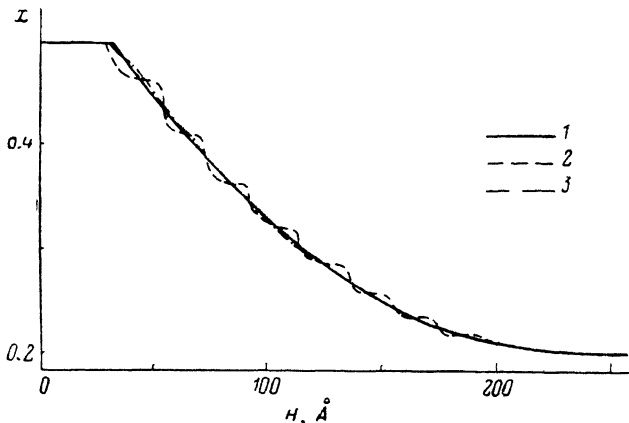


Рис. 5. Профиль состава твердого раствора.

1 — требуемый, 2 — режим  $\alpha$ , 3 — режим  $\gamma$ .

только для малых  $N$ . Некорректность задачи при больших  $N$  проявляется в неустойчивости решения, осциллирующего с большой амплитудой ( $q \geq \max_i |\Delta C_i|$ ).

Как показали методические расчеты [18], существует достаточно широкая область значений  $\beta$  и  $\gamma$  ( $\alpha=0$ ), обеспечивающих получение удовлетворительного решения для случая линейного и параболического изменения состава твердого раствора в переходной области, поэтому удается с помощью одного набора параметров регуляризации описать выращивание градиентных слоев различной толщины как в режимах с преобладанием вынужденной конвекции,

так и в естественной-конвективных режимах. Большая часть приведенных ниже результатов получена при  $\alpha=0$ ,  $\beta=\gamma=0.01$ .

Рассмотрим выращивание слоев твердого раствора с линейным и параболическим изменением состава по толщине. Следует отметить два важных для практики обстоятельства, связанные с особенностями функций отклика (рис. 2).

Во-первых, в реальной газопитаксиальной установке время между двумя последовательными коррекциями входных концентраций  $\delta t = t_{i+1} - t_i$  ограничено снизу некоторым значением  $\delta t_0$ . Если  $\delta t_0$  велико по сравнению с шириной функции отклика  $\tau$ , то профиль состава выращенного твердого раствора будет иметь ступенчатый характер (рис. 5, штриховая линия, выращивание в режиме *a*).

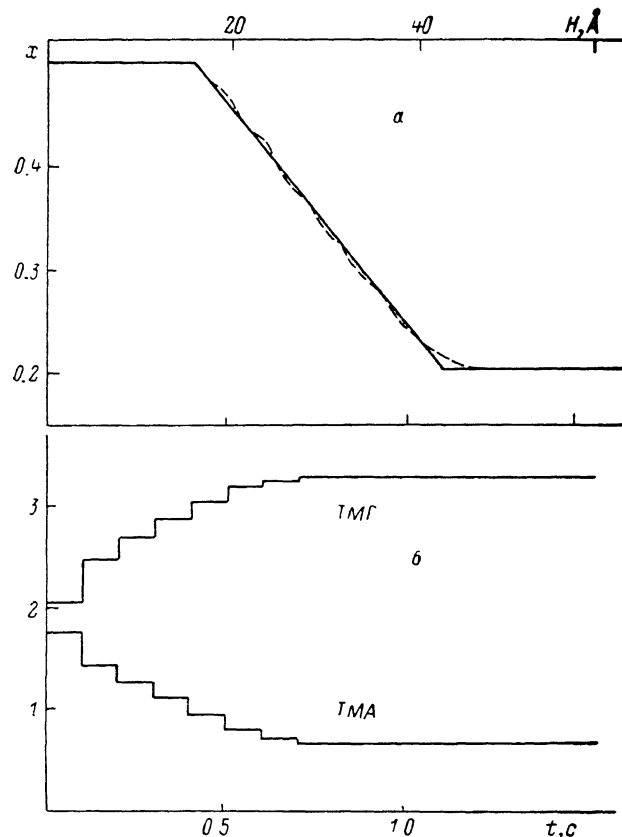


Рис. 6. Профиль состава твердого раствора (*a*) и концентрации ТМГ и ТМА на входе (*б*).

Очевидно, однако, что выбором режима течения можно добиться выполнения условия  $\delta t_0 \leq \tau$  (штрихпунктирная линия, выращивание в режиме *г*).

Во-вторых, в силу нелинейности функций отклика при выращивании слоя с линейным изменением состава твердого раствора по толщине входные концентрации ТМГ и ТМА должны изменяться, вообще говоря, нелинейным образом. Пример рассчитанного профиля (штриховая линия) при выращивании слоя с линейным изменением состава (сплошная линия) в режиме течения *a* приведен на рис. 6, *a*, характер изменения входных концентраций показан на рис. 6, *б*. Линейное изменение концентраций ТМГ и ТМА обеспечивает получение линейного профиля состава только для достаточно толстых градиентных слоев (время выращивания значительно больше ширины функции отклика).

Точность воспроизведения требуемого профиля состава характеризуется максимальной

$$E_c = \max_{t \in [0, t]} |x(t) - x_0(t)|$$

и среднеквадратичной



$$E = \left[ \frac{1}{l} \int_0^l (x(t) - x_0(t))^2 dt \right]$$

погрешностями. На рис. 7, а представлены зависимости  $E_c$  от толщины градиентного слоя для различных  $\delta t$  (линейный профиль состава, режим течения а). Отметим, что при дальнейшем уменьшении  $\delta t$   $E_c$  меняется незначительно. На рис. 7, б для всех рассмотренных режимов приведены зависимости максимальной погрешности от безразмерной толщины слоя  $\bar{H}$ , отнесенной к ширине «наиболее резкого» переходного слоя  $H_* = V_g \tau$ . Из рис. 7 видно, что точность

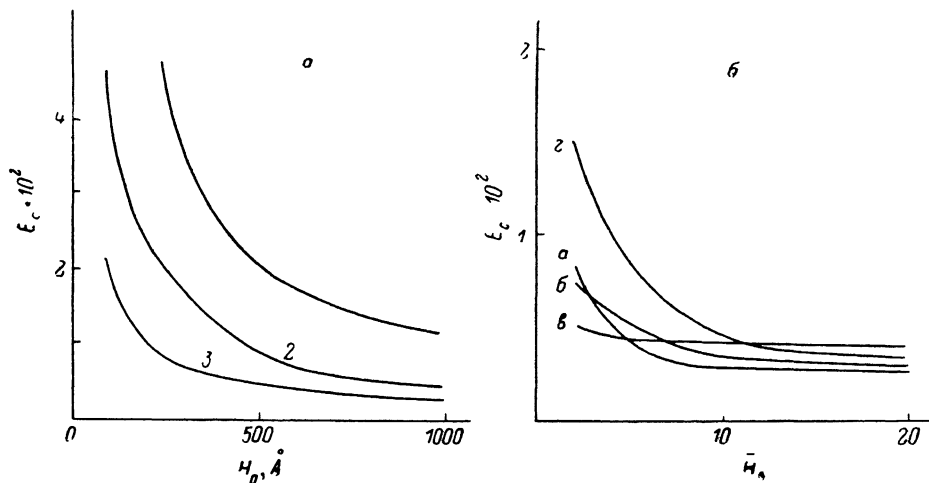


Рис. 7. Зависимость точности воспроизведения профиля состава от абсолютной (а) и относительной (б) толщины градиентного слоя.

а —  $\delta t$ , с: 1 — 2, 2 — 1, 3 — 0.5.

воспроизведения профиля состава возрастает с увеличением толщины слоя. Очевидно, для слоя заданной толщины точность может быть повышена уменьшением скорости роста (пропорциональным уменьшением входных концентраций ТМГ и ТМА). Зависимости  $E_c$  от толщины для параболического профиля аналогичны приведенным на рис. 7. Среднеквадратичная погрешность во всех случаях на порядок меньше максимальной.

Авторы благодарят Б. С. Явича за полезные обсуждения и Т. В. Серову за помощь в оформлении статьи.

#### Список литературы

- [1] Frijlink P. M., Andre J. P., Erman M. // Philips Techn. Rev. 1987. Vol. 43. N 5/6. P. 118—132.
- [2] Hayes J. R., Capasso F., Malik R. J. et al. // Appl. Phys. Lett. 1984. Vol. 43. N 7. P. 949—951.
- [3] Grinberg A. A., Shur M. S., Fisher R. J., Morkoc H. // IEEE Trans. Electron. Devices. 1984. Vol. ED-31. N 12. P. 1758—1765.
- [4] Rao M. A., Caine E. J., Long S. I., Kroemer H. // IEEE Trans. Electron. Devices. 1987. Vol. ED-33. N 11. P. 1845.
- [5] Grinberg A. A., Shur M. S. // Appl. Phys. Lett. 1984. Vol. 45. N 5. P. 573—574.
- [6] Strigfellow G. B. // J. Crystal Growth. 1984. Vol. 68. N 1. P. 111—122.
- [7] Жмакин А. И., Ипатова И. П., Макаров Ю. Н. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 9. С. 1700—1708.
- [8] Жмакин А. И., Коваленков О. В., Кузьмин И. А. и др. // Автометрия. 1988. № 5. С. 80—83.
- [9] Жмакин А. И., Коваленков О. В., Конников С. Г. и др. // Тез. докл. II Всесоюз. конф. «Моделирование роста кристаллов». Рига, 1987. Ч. II. С. 317—319.
- [10] Suzuki M., Sato M. // J. Electrochem. Soc. 1985. Vol. 132. N 7. P. 1684—1688.
- [11] Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 616 с.
- [12] Den Baars S. P., Maa B. Y., Dapkus P. D. et al. // J. Crystal Growth. 1986. Vol. 77. N 1. P. 183—193.
- [13] Makarov Yu. N., Zhmakin A. I. // J. Crystal Growth. 1989. Vol. 94. N 2. P. 537—550.

- [14] *Тихоное А. Н., Арсенин В. Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 286 с.
- [15] *Морозов В. А.* Регулярные методы решения некорректно поставленных задач. М.: Наука, 1987. 240 с.
- [16] *Kosza G., Morgenstern T., Richter F., Valko P.* // Crystal Res. Technol. 1983. Vol. 18. N 12. P. 1533—1540.
- [17] *Valko P., Kosza G., Richter F.* // Crystal Res. Technol. 1983. Vol. 18. N 12. P. 1541—1545.
- [18] *Макаров Ю. Н., Жмакин А. И.* Препринт ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР. № 1248. Л., 1988. 59 с.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
31 января 1989 г.  
В окончательной редакции  
30 мая 1989 г.

