

УДК 621.315.592

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫХ УЗЛОВ УСТАНОВОК ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ**И. В. Шевченко**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: athome050@yandex.ru

Предложена информационная технология для автоматизированного выбора оптимального по геометрическим параметрам теплового экрана, окружающего слиток в процессе выращивания. Математическая модель решения задачи оптимизации содержит критерий минимизации неравномерности осевого градиента температуры и критерий стабилизации на заданном уровне величины радиального градиента температуры в зоне слитка, примыкающей к фронту кристаллизации. Усовершенствован метод решения указанной задачи оптимизации за счет введения новой математической модели и использования эволюционной процедуры оптимизационных расчетов, что позволяет ускорить процесс решения задачи под заданный диаметр слитка – обеспечение необходимого температурного режима в зоне выращивания и в зоне остывания. Проведены расчеты по оптимизации положения теплового экрана, и выбрана его конфигурация и высота расположения над уровнем расплава для конкретной ростовой установки.

Ключевые слова: информационная технология, оптимизация, модель, метод, тепловой узел.**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВИХ ВУЗЛІВ УСТАНОВОК ДЛЯ ВИРОЩУВАННЯ МОНОКРИСТАЛІВ****І. В. Шевченко**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: athome050@yandex.ru

Запропоновано інформаційну технологію для автоматизованого вибору оптимального за геометричними параметрами теплового екрану, що оточує злиток у процесі вирощування. Математична модель вирішення задачі оптимізації містить критерій мінімізації нерівномірності осевого градієнта температури і критерій стабілізації на заданому рівні величини радіального градієнта температури в зоні злитка, що примикає до фронту кристалізації. Удосконалено метод вирішення зазначеної задачі оптимізації за рахунок введення нової математичної моделі та використання еволюційної процедури оптимізаційних розрахунків, що дозволяє прискорити процес розв'язання задачі під заданий діаметр злитку – забезпечення необхідного температурного режиму в зоні вирощування і в зоні охолодження. Проведено розрахунки з оптимізації положення теплового екрану, і обрана його конфігурація і висота розташування над рівнем розплаву для конкретної ростової установки.

Ключові слова: інформаційна технологія, оптимізація, модель, метод, тепловий вузол.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Степень повышения качества материалов электронной техники зависит от двух основных факторов – совершенства технологического оборудования и совершенства систем управления режимом выращивания монокристаллов полупроводников. И в том, и в другом аспекте на передний план выдвигается третий фактор – использование современных информационных технологий.

В большинстве практических случаев выращивание монокристаллов арсенида галлия (GaAs) и других полупроводников методом Чохральского сопровождается возникновением внутренних макронапряжений, которые не только определяют формирование дислокационной структуры в процессе роста, но и в значительной мере влияют на механические и физические свойства выращенных кристаллов. Наибольший вклад в возникновение напряжений при росте кристаллов вносят неоднородное поле температурных деформаций, обуславливающее термоупругие напряжения [1].

Тепловые узлы существующих в настоящее время ростовых установок по методу Чохральского включают экраны, которые должны обеспечить оптимальный тепловой режим для растущего слитка в зоне, примыкающей к фронту кристаллизации и, соответственно, минимизацию неравномерности

температурных градиентов. Однако, несмотря на большое количество исследований, в настоящее время не найдено оптимальных конфигураций экрана для различных сочетаний геометрических параметров теплового узла.

Цель работы – разработка модели, метода и информационной технологии автоматизированного решения задачи оптимизации конфигурации теплового экрана ростовой установки для выращивания монокристаллов методом Чохральского.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Анализ результатов предыдущих исследований и постановка задачи. Традиционно для решения задачи выбора формы, размеров и расположения экрана используется метод вычислительных экспериментов [2]. На основе локальных или глобальных тепловых моделей строится численное решение задачи тепло-массопереноса. При этом исследователь задает конфигурацию и геометрические параметры теплового узла и с помощью какого-либо стандартного программного пакета строит сетку конечных элементов. Далее в программу вводятся граничные условия. Получив решение в числовом и графическом виде, разработчик пытается установить эмпирическую связь между размерами и расположением экранов и температурными полями и градиентами. Чтобы ус-

тановить таку зв'язь, приходиться многократно перестраивать конфигурацию теплового узла, заново вводить геометрические параметры, заново строить сетку конечных элементов. Сложность тепловой конечно-элементной модели, и отсутствие строгой постановки задачи заставляет разработчика действовать на основании опыта и интуиции.

Для автоматизированного расчета оптимальных геометрических параметров теплового узла необходим другой подход, который заключается в установлении закономерностей влияния геометрии теплового экрана (или системы экранов) на распределение температур в рабочей зоне ростовой установки и в слитке. Для установления таких закономерностей была сформирована математическая модель, отражающая связь между геометрическими параметрами тепловых экранов и параметрами тепловых потоков в тепловом узле, а также разработаны модель и метод оптимизации конфигурации теплового экрана, форма и положение которого оказывают критическое влияние на режим охлаждения слитка в процессе выращивания [3, 4].

С учетом сказанного выше, в работе предлагается информационная технология автоматизации процесса выбора оптимального по геометрическим параметрам теплового экрана, окружающего охлаждающую часть слитка в процессе выращивания монокристаллов арсенида галлия.

Состав информационной технологии. Разработанная информационная технология оптимизации геометрических параметров тепловых экранов установок для выращивания монокристаллов полупроводников включает в себя:

1. Комплекс математических моделей и методов, в том числе:
 - модель оптимизации геометрических параметров теплового экрана (M1);
 - модель конфигурации теплового узла (угловые коэффициенты и уравнения тепловых потоков излучения) (M2);
 - модель аппроксимации закона распределения температуры на стенке тигля (M3);
 - модель аппроксимации закона распределения температуры на поверхности герметизатора (M4);
 - модель аппроксимации закона распределения температуры в зоне кристаллизации (M5);
 - метод численного расчета температурного поля в слитке и расплаве;
 - метод оптимизации геометрических параметров теплового экрана.

2. Система взаимосвязанных информационных процессов.

3. Программный модуль, реализующий процедуру оптимизации.

4. ЭВМ, осуществляющая процесс расчета тепловых полей и процедуру оптимизации параметров теплового экрана.

Структура данных. Исходными данными для решения задачи оптимизации являются: заданный диаметр слитка, высота выращенного слитка, диаметр тигля, высота тигля, внутренний диаметр экра-

на, высота экрана, высота слоя герметизатора, см; плотность GaAs (кристалл), г/см³; плотность GaAs, (расплав) г/см³; плотность герметизатора (B₂O₃), г/см³; теплопроводность GaAs (кристалл), Вт/см·К; теплопроводность GaAs (расплав), Вт/см·К; теплопроводность B₂O₃, Вт/см·К; излучательная способность GaAs (кристалл); излучательная способность B₂O₃; температура плавления GaAs, °С; температура фонового нагревателя, °С; уровень расплава в тигле, %.

Промежуточными данными являются: массив значений температуры на поверхности герметизатора, °С; массив значений температуры на поверхности тигля, °С, теплопроводность GaAs в зоне фронта кристаллизации, Вт/см·К; степень затвердевания дискретных областей в зоне фронта кристаллизации (ячеек клеточного автомата); температура в заданных точках расплава, °С; температура в заданных точках кристалла, °С; эффективный коэффициент теплоотдачи с поверхности слитка.

Конечные данные: массив распределения температур в расплаве, °С; массив распределения температур в кристалле, °С; температурные градиенты в зоне фронта кристаллизации; температурные градиенты в слитке; геометрические параметры экрана.

Математическая модель задачи оптимизации конфигурации и положения теплового экрана. Оптимизация параметров конфигурации теплового экрана проводится по критерию минимизации неравномерности осевого и радиального градиентов температуры в слитке.

При математической постановке данной задачи необходимо учесть два важных фактора, связанных с физическими условиями роста монокристалла. Во первых, рост монокристалла возможен только при наличии некоторого минимального осевого градиента температуры на фронте кристаллизации. Во вторых, для минимизации радиальных температурных напряжений в зоне слитка, примыкающей к фронту кристаллизации, необходимо минимизировать радиальный градиент температуры в этой зоне.

В работе [4] разработана математическая модель задачи оптимизации конфигурации теплового экрана по критерию минимизации неравномерности осевого температурного градиента в остывающем слитке. В данной работе предлагается усовершенствованная модель, позволяющая решить две взаимосвязанные задачи – стабилизировать на минимальном уровне радиальный температурный градиент в зоне, примыкающей к фронту кристаллизации и минимизировать неравномерность осевого температурного градиента в зоне остывания слитка.

Аналитическая связь между скоростью v_s роста кристалла и тепловыми условиями имеет вид [5]:

$$v_s L \rho_s = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} - \alpha (T_L - T_{пл}) \quad (1)$$

где $T_{пл}$ – температура плавления (кристаллизации); α – коэффициент теплопередачи на фазовой границе, λ_s – коэффициент теплопроводности в твердом состоянии, ρ_s – плотность монокристалла, L – скрытая теплота кристаллизации.

Отсюда

$$\frac{\partial T_s}{\partial z} = \frac{v_s L \rho_s + \alpha (T_L - T_{nz})}{\lambda_s} \quad (2)$$

В свою очередь, величина скорости выращивания непосредственно влияет на объем выращиваемого кристалла:

$$V_s = v_s \pi R_k^2 t, \quad (3)$$

где t – время протекания процесса выращивания.

Таким образом, заранее определив параметры процесса выращивания и параметры материала, можно получить константу, устанавливающую заданное усредненное значение осевого градиента температуры в области фронта кристаллизации:

$$\frac{\partial \bar{T}_s}{\partial z} = G_0. \quad (4)$$

Меньшие значения градиента приведут к резкому замедлению роста монокристалла, а большие значения могут вызвать нежелательные изменения структуры.

Поскольку температурные напряжения в основном являются следствием неравномерного изменения градиента температуры GZ вдоль оси z слитка, локальным критерием оптимизации должен служить

$$F(R_y, L_y, H_y) = \left[\alpha(i) \sum_{i=1}^N (GZ_i - GZ_0)^2 + \beta(i) \sum_{j=1}^M (GR_j - GR_0)^2 \right] \rightarrow \min, \quad (7)$$

где весовые коэффициенты $\alpha(i)$ и $\beta(i)$ изменяются следующим образом:

$$\alpha(i) = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq i < 2 \\ 0,5 & \text{if } i = 2 \\ 0 & \text{if } i > 2 \end{cases}, \quad \beta(i) = \begin{cases} 1 & \text{if } i \in [0, 2] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (8)$$

Ограничения задачи служат граничные условия по температуре, задаваемые на рабочих поверхностях тигля, на поверхности расплава и закон распределения температуры по поверхности экрана вдоль оси z с учетом изменения радиуса экрана:

$$T_{фк} = T_{фк}(r), \quad (9)$$

$$T_p = T_p(r), \quad (10)$$

$$T_r = T_r(h), \quad (11)$$

$$T_3 = T_3(z, r_3). \quad (12)$$

Тогда задачу оптимизации размеров и положения экрана можно поставить следующим образом: найти оптимальные геометрические параметры экрана L_3, R_3, H_3 при заданных значениях R_c, R_t , граничных условиях (9)–(12) и минимизации критерия (7).

Эволюционный метод решения задачи оптимизации. Основные положения метода решения задачи оптимизации геометрических параметров теплового экрана можно представить следующим образом:

минимум величины квадрата отклонения значений усредненного по радиусу слитка градиента GZ от константы GZ_0 , т.е.

$$F(R_y, L_y, H_y) = \sum_{i=1}^N (GZ_i - GZ_0)^2 \rightarrow \min, \quad i = \overline{1, N}, \quad (5)$$

где N – количество дискретных цилиндрических областей слитка вдоль оси z , R_3 – радиус экрана, L_3 – высота экрана, H_3 – высота экрана на уровне расплава (герметизатора).

Вторым локальным критерием оптимизации служит критерий стабилизации на минимальном уровне радиального температурного градиента GR :

$$F(R_y, L_y, H_y) = \left[\sum_{j=1}^M (GR_j - GR_0)^2 \right] \rightarrow \min, \quad j = \overline{1, M}, \quad (6)$$

где GR_0 – пороговое значение градиента, превышение которого приводит к недопустимому риску увеличения плотности дислокаций в слитке.

Объединяя выражения (5) и (6), получим обобщенный критерий вида

1. Оптимизация размеров и положения теплового экрана происходит по интегральному критерию, учитывающему два важных показателя – неравномерность осевых градиентов температуры в слитке и минимум радиальных градиентов в зоне, примыкающей к фронту кристаллизации.

2. В качестве исходных данных используются значения геометрических параметров теплового узла (радиус слитка R_c , закон изменения радиуса экрана $R_3 = k \cdot z + c$, высота экрана L_3 , высота расположения экрана над расплавом H_3 , радиус тигля R_t , и др.) и допустимые диапазоны изменения геометрических параметров экрана R_{3min}, R_{3max}, L_3 и H_3 . Задаётся также текущая высота слитка Z_t .

3. Для численного решения задачи расчета теплового поля в слитке задаются граничные условия (распределение температуры на стенке тигля, распределение температуры по поверхности экрана, распределение температуры по поверхности расплава, температура окружающей среды).

4. При помощи эволюционного алгоритма генерируется популяция допустимых решений в виде четверок $(k_3, c_3, L_{3k}, H_{3k})$, $k = \overline{1...P}$, где P – число членов популяции.

5. Каждая четверка $(k_3, c_3, L_{3k}, H_{3k})$ используется в модели конфигурации теплового узла и, соответственно, для вычисления градиентов температуры по оси и по радиусу слитка.

6. Для каждой четверки $(k_3, c_3, L_{3k}, H_{3k})$ вычисляется значение критерия (7).

7. При помощи эволюционных процедур, описанных ниже, с повторением пунктов 3–5, отбирается наилучшее решение по критерию (7).

Применение эволюционного алгоритма для решения задачи оптимизации. Предварительные исследования показали, что критерий (7) является мультимодальной функцией. С учетом этого факта для решения поставленной задачи целесообразно использовать адаптивные методы случайного поиска, развитием которых являются эволюционные алгоритмы [6]. Основная продуктивная идея эволюционных алгоритмов состоит в том, что поиск ведется по всей области допустимых значений и в процессе его выполнения изменяются условия генерации вектора рабочих параметров. Обычно на начальных этапах распределение точек является равномерным, а потом количество точек увеличивается в тех областях, где предположительно находятся локальные экстремумы целевой функции. Уточнение значений локальных экстремумов можно производить с помощью случайного поиска в узкой области, которая предположительно содержит локальный экстремум. Вероятность быстрого схождения алгоритма при этом значительно возрастает и, тем самым, ускоряется весь процесс поиска оптимального решения. Таким образом, эволюционные алгоритмы используют информацию о рельефе поверхности функции цели.

С учетом изложенного сформулируем основные правила, которые должен использовать метод поиска оптимального решения:

1. Обеспечение равномерного поиска во всей области определения функции цели.

2. Обеспечение сужения границ случайного поиска в отдельных областях, которые предположительно содержат локальные экстремумы.

3. Узкие границы локального поиска адаптивно смещаются по мере уточнения значения локального экстремума.

4. Выбор для локального анализа не только элитарных точек, но и нескольких случайных точек.

Ниже приведены этапы алгоритма для реализации разработанного метода:

1. Генерация исходной популяции. Синтезируется P точек \bar{X}_k ($k = 1, \dots, P$), в которых определяется значение целевой функции.

2. Сортировка наборов \bar{X}_k (особей) по возрастанию значений (поскольку в решаемой задаче ищется минимум целевой функции).

3. Из всех P точек отбирается η первых точек – претендентов на лидерство.

4. Из оставшихся $P - \eta$ точек случайным образом выбираются еще η точек.

5. Вычисляются границы поиска уточненного значения экстремума для каждой из 2η выбранных точек:

$$a' = x^* - A(b-a)/2, \quad b' = x^* + A(b-a)/2,$$

где a' , b' – суженные границы поиска; a , b – начальные границы поиска; x^* – координата выбранного решения; A – размер границы для уточненного поиска экстремума.

6. Генерируется M точек в границах a' , b' .

7. Для каждой точки X_l , $l \in M$ вычисляется значение целевой функции. Если новое значение меньше предшествующего, соответственно изменяются значения x^* .

Как результат в массиве популяции для выбранных точек фиксируются новые значения координат и локальных экстремумов.

8. Массив популяции сортируется по возрастанию значения целевой функции.

9. Если количество заданных итераций не исчерпано, то для всех особей, кроме η лучших, генерируются новые случайные значения координат и происходит переход к п.3. Иначе переход к п.10.

10. Первый элемент в списке особей является найденным оптимальным решением. Конец.

Алгоритм имеет следующие параметры настройки:

1) P – количество членов популяции;

2) η – количество претендентов в элиту и количество особей, которые случайно добавляются к элите.

3) A – коэффициент уменьшения границ для уточненного поиска экстремума.

4) M – количество пробных точек в узких границах уточненного поиска.

Информационная технология оптимизации Геометрических параметров теплового экрана. Основу информационной технологии оптимизации геометрических параметров теплового экрана, окружающего выращиваемый слиток, составляет совокупность взаимосвязанных информационных процессов (ИП) и моделей, перечисленных выше (рис. 1):

Рассмотрим информационные процессы (ИП), показанные на рис. 1.

ИП1. Задание исходных данных: радиус слитка R_c ; текущая высота слитка Z_i ; параметры функции изменения радиуса k , c ; высота экрана L_3 ; высота расположения экрана над расплавом H_3 ; радиус тигля R_t ; высота тигля H_t ; допустимые диапазоны изменения геометрических параметров экрана R_{\min} , R_{\max} , L_3 и H_3 .

ИП2. Для расчетной тепловой модели задаются граничные условия (распределение температуры на фронте кристаллизации, распределение температуры по поверхности экрана, распределение температуры по поверхности расплава, температура окружающей среды и температура стенки тигля). Задействованы модели М3, М4, М5.

Для учета распределения температуры на стенке тигля (модель М3) используется функциональная зависимость, полученная аппроксимацией данных, полученных в ходе экспериментов. В табл. 1 представлены усредненные данные эксперимента. По оси ординат отложены отклонения температуры стенки тигля от температуры плавления GaAs. Аппроксимирующая кривая и её уравнение показаны на рис. 2.

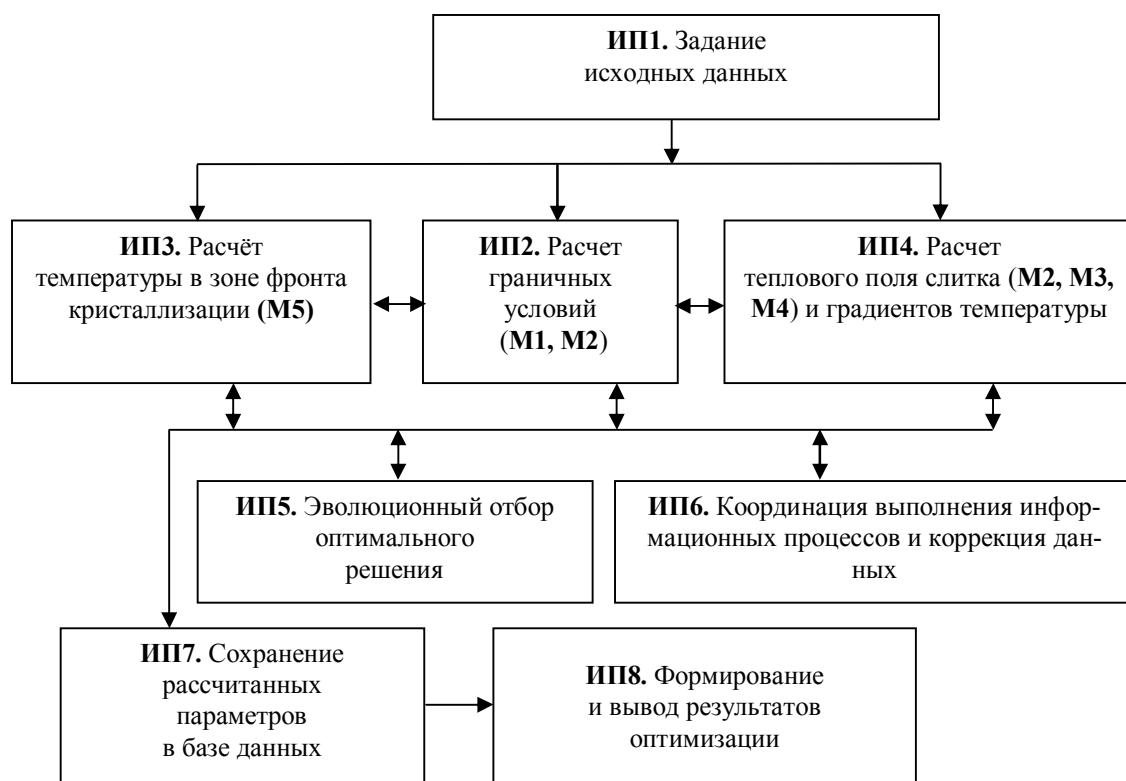


Рисунок 1 – Общая схема информационной технологии оптимизации геометрических параметров теплового экрана.

Таблица 1 – Распределение приведённой температуры на стенке тигля

Приведённая координата h	0	1	2	3	4
$T(h), ^\circ\text{C}$	3	8	25	39	45

Распределение температуры на поверхности герметизатора (модель М4) получено и аппроксимировано экспериментально, так же, как и распределение температуры на стенке тигля.

В табл. 2 представлены усредненные данные эксперимента. По оси ординат отложены абсолютные значения температуры. По оси абсцисс отложе-

на относительная координата, привязанная в радиусу тигля. Аппроксимирующая кривая и её уравнение представлены на рис. 3. Температура на поверхности экрана была измерена при помощи термпар и зафиксирована в виде таблицы экспериментальных данных (табл. 3).

Таблица 2 – Распределение температуры на поверхности герметизатора

Относительная координата	0,43	0,57	0,71	0,86	1,0
$T, ^\circ\text{C}$	1071	1067	1066	1074	1092

Таблица 3 – Распределение температур на поверхности экрана

№ Тп	1	2	3	4	5	6	7
$T, ^\circ\text{C}$	903	869	832	793	741	681	623
№ Тп	8	9	10	11	–	–	–

ІП3. Производится расчет (аппроксимация) температурного поля в зоне кристаллизации. Задействована модель М5, представляющая собой нейросетевую аппроксимацию температурного поля, подобную описанной в работе [7].

ІП4. Производится расчет температурного поля в слитке с учетом граничных условий методом ко-

нечных разностей на двумерной сетке. Задействована модель М2 – модель конфигурации теплового узла (угловые коэффициенты и уравнения тепловых потоков излучения) [3]. По результатам расчета определяются и градиенты температуры по оси и радиусу слитка. Задействованы также модели М3 и М4.

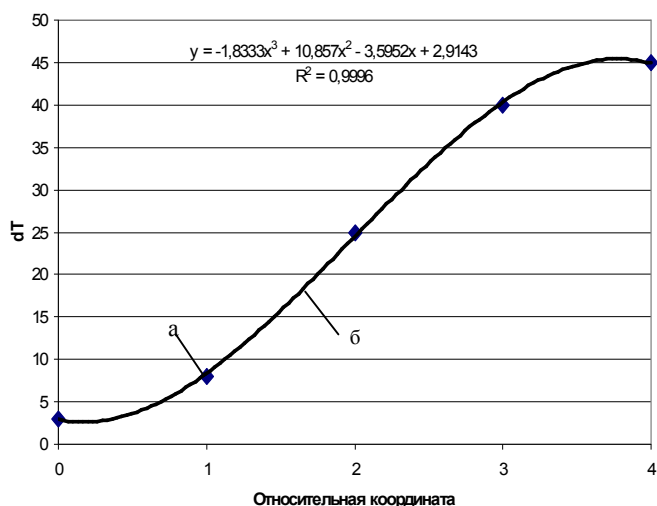


Рисунок 2 – Кривая распределения температуры на стенке тигля: а) эксперимент, б) аппроксимация

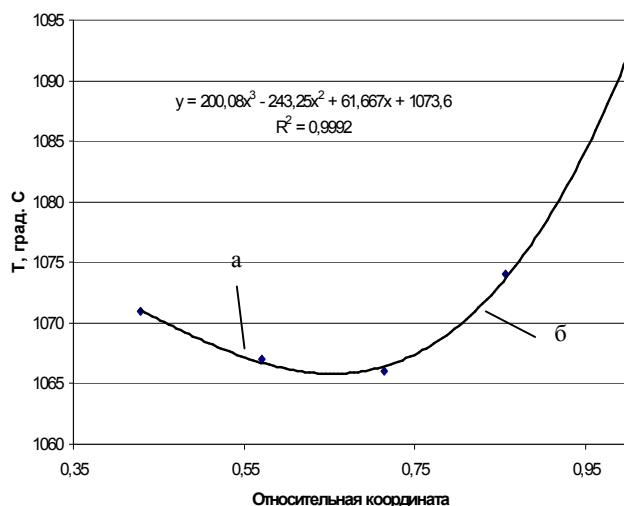


Рисунок 3 – Кривая распределения температуры на поверхности герметизатора: а) эксперимент б) аппроксимация

ИП5. При помощи эволюционного алгоритма оптимизации генерируется популяция допустимых решений $P(k_{zj}, c_{zj}, L_{zj}, H_{zj})$ в виде четверок $(k_{zj}, c_{zj}, L_{zj}, H_{zj})$, $j=1...N$, где N – число членов популяции. Каждая четверка $(k_{zj}, c_{zj}, L_{zj}, H_{zj})$ используется для изменения конфигурации теплового узла в модели. При помощи эволюционных процедур, описанных выше, отбирается наилучшее решение по критерию (7). Задействована модель решения задачи оптимизации М1.

ИП6. Координация выполнения информационных процессов и коррекция массивов данных.

ИП7. Сохранение рассчитанных параметров в базе данных.

ИП8. Формирование и вывод результатов оптимизации.

Определение оптимальной конфигурации теплового экрана. Для решения описанной выше задачи оптимизации было разработано специальное программное обеспечение, которое обеспечивает ввод исходных данных через пользовательский интерфейс, решение тепловых уравнений методом конечных разностей, нейросетевую аппроксимацию решения в зоне фронта кристаллизации, выбор опти-

мальных размеров и положения экрана и вывод результатов решения в табличном виде.

Результаты расчета экспортируются в электронную таблицу Microsoft Excel для построения графиков, а также могут обрабатываться в пакете MathCad. Для проверки результатов оптимизации были произведены расчеты температурных градиентов в слитке при двух вариантах конфигурации теплового экрана – существующем на стандартной установке «Арсенид-1» и экспериментальной – «Арсенид-М».

На рис. 4 показан график изменения градиента температуры вдоль оси слитка арсенида галлия диаметром 75 мм и длиной 120 мм.

Благодаря использованию комплексного критерия оптимизации удалось также ограничить значение радиального градиента температуры в зоне, примыкающей к фронту кристаллизации на уровне 7–8 °С против 15–18 °С в установке «Арсенид-1». Следует заметить однако, что величина радиального градиента в этой зоне также в значительной степени зависит от температуры фонового нагревателя, который используется при выращивании слитков GaAs.

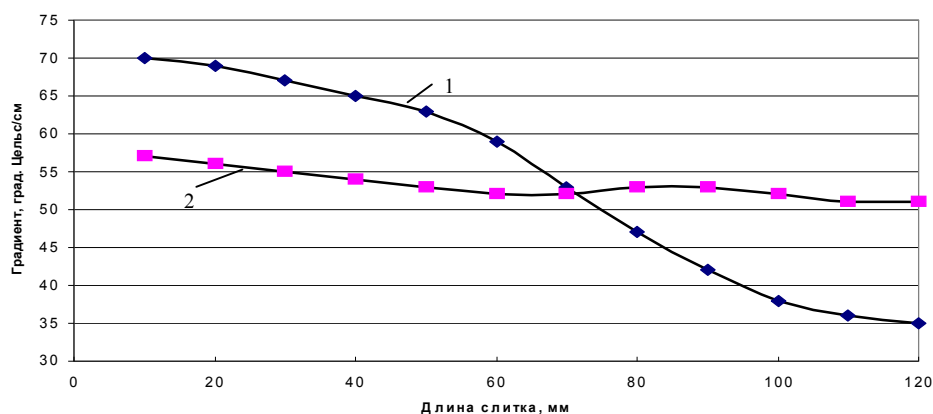


Рисунок 4 – Результаты расчетов градиента температуры вдоль оси z слитка: 1 – установка «Арсенид-1»; 2 – установка «Арсенид-1М» с модернизированным тепловым узлом

ВИВОДИ. Усовершенствована математическая модель решения задачи оптимизации геометрических параметров теплового экрана, за счет введения в критерий оптимизации функции стабилизации на заданном уровне значения радиального градиента температуры в зоне слитка, примыкающей к фронту кристаллизации.

Усовершенствован метод решения указанной задачи оптимизации за счет введения новой математической модели и использования специально разработанной эволюционной процедуры оптимизационных расчетов, что позволяет ускорить процесс решения задачи и тем самым обеспечить оптимальную технологическую подготовку производства под заданный диаметр слитка, т.е. необходимый температурный режим в зоне выращивания и остывания.

Разработана информационная технология автоматизированного решения задачи оптимизации конфигурации теплового экрана ростовой установки для выращивания монокристаллов методом Чохральского.

Проведены расчеты по оптимизации положения теплового экрана и выбрана его конфигурация и высота расположения над уровнем расплава для конкретной ростовой установки.

Полученная конфигурация теплового экрана позволяет снизить неравномерность осевых температурных градиентов и обеспечить эффективное ограничение радиального градиента температуры в зоне, примыкающей к фронту кристаллизации, что снижает вероятность возникновения повышенной плотности дислокаций в монокристалле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оксанич А.П., Шепель Л.Г., Батареев В.В. Моделирование процессов образования дислокаций под действием термических напряжений в слитках GaAs, выращиваемых из расплава методом Чохральского с жидкостной герметизацией // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – Т. 4, № 2. – С. 185–194.
2. Simulation of temperature distribution in crystals grown by Czochralski method / P.A. Ramachandran, M.P. Dudukovi // Journal of Crystal Growth. – 1985. – Vol. 71, № 2. – PP. 399–408.
3. Оксанич А.П., Хозя П.П., Шевченко И.В. Математическая модель геометрии теплового узла установки для выращивания монокристаллов GaAs методом Чохральского // Прикладная радиоэлектроника. – 2008. – Т. 7, № 4. – С. 351–355.
4. Шевченко И.В., Оксанич А.П., Волохов С.А. Оптимизация конфигурации теплового экрана ростовой установки по критерию минимума неравномерности осевых температурных градиентов // Системні технології. – 2010. – № 1(66). – С. 3–17.
5. Тилман Б.Л., Бурачас С.Ф. Анализ условий выращивания монокристаллов методом Чохральского // Физика и химия кристаллов. – 1977. – № 3. – С. 1–5.
6. Васильев В.Ф. Методы оптимизации. – М.: Изд-во. Факториал-Пресс, 2002. – 824 с.
7. Оксанич А.П., Шевченко И.В., Краснопольская Ю.А. Метод и нейросетевая модель расчёта температурного поля расплава в процессе выращивания методом Чохральского // Вестник Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского. – 2010. – № 1(72), част. 1. – С. 54–60.

OPTIMIZATION OF INFORMATION TECHNOLOGY OF GEOMETRIC PARAMETERS OF THERMAL UNITS FOR SINGLE CRYSTALS GROWING PLANTS

I. Shevchenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: athome050@yandex.ru

The author has developed information technology for automated selection of optimal geometric parameters of the heat shield surrounding an ingot during its growing. A mathematical model for solving an optimization problem contains a minimization criterion of a non-uniformity degree of an axial temperature gradient and a stabilization criterion for the level set of the radial temperature gradient in the area of the ingot adjacent to the crystallization front. Also, it was improved the method to solve this optimization problem by introducing a new mathematical model and use evolutionary procedures of optimization calculations. Such improvements can accelerate the process of the problem solving for the nominal diameter of an ingot and maintain required temperature in the growing area and in the area of cooling. The author has performed the calculations to optimize the position of the heat shield and select the configuration and its location above the height of the melt for a specific grower unit.

Key words: information technology, optimization, model, method, thermal unit.

REFERENCES

1. Oksanych, A.P., Shepel, L.G., Batareev, V.V. (2005), "Modeling of the dislocations caused by thermal stresses in GaAs ingots, grown from the melt by the Czochralski method with liquid seal", *Prikladnaya radioelektronika*, vol. 4, no.2, pp. 185–194.
2. Ramachandran, P.A., Dudukovi, M. P. (1985), "Simulation of temperature distribution in crystals grown by the Czochralski method", *Journal of Crystal Growth*, vol. 71, no.2, pp. 399–408.
3. Oksanych, A.P., Hozya, P.P., Shevchenko, I.V. (2008), "Mathematical model of the geometry of a thermal unit of set for GaAs single crystals growing by the Czochralski method", *Prikladnaya radioelektronika*, vol. 7, no. 4, pp. 351–355.
4. Shevchenko, I.V., Oksanych, A.P., Volohov, S.A. (2010), "Optimization of configuration of the heat shield of a growth set by minimum non-uniformity of axial temperature gradients", *Systemni tekhnologii*, no. 1(66), pp. 3–17.
5. Tilman, B.L., Burchas, S.F. (1977), "Analysis of conditions of single crystals growing by the Czochralski method", *Fizika i khimiya kristallov*, no. 3. pp. 1–5.
6. Vasilyev, V.F. (2002), *Metody optimizatsii* [Optimization methods], Factorial-Press, Moscow, Russia.
7. Oksanych, A.P., Shevchenko, I.V., Krasnopol'skaya, U.A. (2010), "The method and the neural network model to calculate a temperature field of a melt during the growth by the Czochralski method", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi State University*, no. 1(72), vol.1, pp. 54–60.

Стаття надійшла 28.08.2013.