

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

*Разработана информационная технология мониторинга температурного поля в процессе выращивания монокристаллов полупроводников, включающая комплекс математических моделей и методов, систему взаимосвязанных информационных процессов и комплекс технических и программных средств.*

*Ключевые слова: информационная технология, мониторинг температурных полей, выращивание монокристаллов*

V.M. LEVYKIN, I.V. SHEVCHENKO

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University

## INFORMATION TECHNOLOGY FOR TEMPERATURE FIELDS MONITORING DURING THE CZOCHRALSKI SINGLE CRYSTALS GROWTH PROCESS

*The authors have developed the information technology for monitoring the temperature field during the growing of semiconductor single crystals. The information technology includes a complex of mathematical models and methods, a system of complementary information processes, and hardware and software complex.*

*Keywords: information technology, temperature fields monitoring, single crystals growth.*

### Постановка задачи

Повышение требований к структурному совершенству полупроводниковых монокристаллов ведёт к необходимости усовершенствования технологического процесса их изготовления. При отсутствии принципиально новых методов получения монокристаллов технологический процесс может быть усовершенствован как за счёт применения модернизированного оборудования, так и за счёт совершенствования автоматизированных систем управления, а именно – включения в состав таких систем подсистем мониторинга температурных полей расплава и слитка, анализа текущего состояния процесса выращивания и поддержки принятия оперативных решений.

Для реализации указанных подсистем необходимо разработать информационную технологию мониторинга температурных полей, в основу которой положены накопленные экспериментальные данные и теоретические знания о кинетике и динамике процесса выращивания.

Как известно, любая информационная технология базируется на определенных методах, моделях и информационных процессах. Можно утверждать, что применение выбранных методов базируется на использовании соответствующих моделей и алгоритмов, а, следовательно, при разработке информационной технологии необходимо определить её статическую часть – совокупность математических моделей и структуру данных, а также описать динамическую составляющую информационной технологии – информационные процессы и их взаимодействие.

### Состав информационной технологии

Разрабатывая информационную технологию необходимо определить её статическую часть – структуру данных (DS) и комплекс математических методов и моделей (CMM), а также описать динамическую составляющую информационной технологии – информационные процессы (IP) и их взаимодействие между собой (IPI). Исходя из этого информационная технология должна представляться набором:

$$IT = \langle DS, CMM, IP, IPI \rangle.$$

Состав информационной технологии определен исходя из требований мониторинга одного из наиболее сложных процессов выращивания, а именно выращивания монокристаллов арсенида галлия из под слоя герметизатора. Разработанная информационная технология мониторинга температурного поля в процессе выращивания монокристаллов арсенида галлия включает в себя:

#### 1. Комплекс математических моделей и методов, в том числе:

- модель аппроксимации закона распределения температуры на стенке тигля (M1);
- модель аппроксимации закона распределения температуры на поверхности герметизатора (M2);
- нейросетевая модель, вычисляющая температуру в слитке (M3);
- нейросетевая модель, вычисляющая температуру в расплаве (M4);
- модель процесса кристаллизации (M5);
- модель расчета температуры фоновой нагревателя (M6);
- метод расчета температурного поля расплава (МРТП);
- метод моделирования процесса кристаллизации (ММПК).

#### 2. Комплекс технических и программных средств, в том числе:

- датчики температуры, датчики скоростей вращения и вытягивания;
- датчик массы выращенного слитка;

- периферийные устройства для ввода неизменных для данного процесса значений параметров.

#### Структура данных

Нижче представлений перелік вихідних, первинних, вторинних, проміжних і кінцевих даних, необхідних для забезпечення функціонування підсистеми віртуального моніторингу температурних полів, а також даних, інтерпретуваних як знання.

1. Вихідні дані: маса завантаження, кг; маса герметизатора, кг; маса заправки, кг; заданий діаметр слитка, см; радіус заправки, см; довжина заправки, см; швидкість обертання заправки, об/хв; швидкість обертання тигля, об/хв; діаметр тигля, см; висота тигля, см; внутрішній діаметр екрана, см; висота екрана, см; висота шару герметизатора, см; густина GaAs (кристалл), г/см<sup>3</sup>; густина GaAs (розплав), г/см<sup>3</sup>; густина В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>, г/см<sup>3</sup>; теплопровідність GaAs (кристалл), Вт/смК; теплопровідність GaAs (розплав), Вт/смК; теплопровідність В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>, Вт/смК; випромінювальна здатність, GaAs (кристалл); випромінювальна здатність В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>; температура плавлення GaAs, °С; кристаллографічне напрямлення площини росту монокристала.

2. Первинні дані: температура основного нагрівача, °С; потужність фоновий нагрівача (ФН), Вт; швидкість переміщення штифта заправки, мм/хв; швидкість переміщення штифта тигля, мм/хв; температура розплаву під шаром герметизатора, °С; поточна маса слитка, кг; потужність теплового екрана (при наявності активного екрана), Вт.

3. Вторинні дані, отримані в результаті розрахунків: температура фоновий нагрівача, °С; рівень розплаву в тиглі, %; масив значень температури на поверхні герметизатора, °С; масив значень температури на поверхні тигля, °С; поточний діаметр слитка, см; поточна довжина слитка, см; теплопровідність GaAs в зоні ФК, Вт/смК; ступінь затвердіння дискретних областей в зоні фронту кристалізації (ячеек клітинного автомата); температура в заданих точках розплаву, °С; температура в заданих точках кристала, °С; ефективний коефіцієнт теплоотдачі з поверхні слитка; номер стадії процесу вирощування.

4. Кінцеві дані: масив розподілу температур в розпаві, °С; масив розподілу температур в кристалі, °С; форма фронту кристалізації (графік); температурні градієнти в зоні фронту кристалізації; температурні градієнти в слитку.

5. Дані бази знань: масиви вагових коефіцієнтів нейронної мережі, що обчислює температуру в розпаві; масиви вагових коефіцієнтів нейронної мережі, що обчислює температуру в слитку; таблиця правил переключення структури нейронної мережі, що обчислює температуру в розпаві; таблиця правил переключення структури нейронної мережі, що обчислює температуру в слитку; таблиця правил для визначення порушення оптимальних умов вирощування.

Моніторинг температурних полів при допомозі набору моделей, що входять до складу підсистеми моніторингу, проводиться за наступним алгоритмом:

ШАГ 1. Налаштування підсистеми віртуального моніторингу при проведенні типового процесу вирощування. При цьому база даних підсистеми оновлюється скоректованими значеннями параметрів моделей.

ШАГ 2. Запуск основного циклу моніторингу з відліком дискретного часу з заданим інтервалом  $\Delta t$ .

На кожному часовому інтервалі циклічно виконуються:

ШАГ 2.1. Фіксація значень прямо вимірюваних і обчислюваних величин (температури основного і потужності фоновий нагрівачів, температури теплового екрана, температури в точці під поверхнею розплаву, швидкості обертання тигля і заправки, маси вирощеного слитка, діаметра слитка, рівня розплаву).

ШАГ 2.2. Розрахунок температури фоновий нагрівача (М6).

ШАГ 2.3. Розрахунок граничних умов для чисельних розрахунків температури на основі прямо вимірюваних величин (М1, М2).

ШАГ 2.4. Нейросетевий розрахунок значень температури розплаву в заданих точках з урахування впливу конвекції в розпаві, швидкості обертання тигля і інших параметрів (М4, МРТП).

ШАГ 2.5. Моделювання процесу кристалізації. Корекція коефіцієнтів теплопровідності розплаву в зоні фронту кристалізації з урахування наявності двохфазної зони (М5, ММПК).

ШАГ 2.6. Нейросетевий розрахунок температури в заданих точках слитка (М3) з урахування граничних умов, в якості яких виступають урівняння теплових потоків випромінювання з поверхонь слитка, тигля, екрана і герметизатора. При цьому враховуються результати розрахунків кроків 2.2–2.5.

ШАГ 2.7. Збереження виміряних і розрахованих параметрів в базі даних.

ШАГ 2.8. Формування і вивід результатів моніторингу в табличному форматі.

ШАГ 2.9. Фіксація часу протікання процесу, поточної довжини і діаметра слитка, рівня розплаву і при необхідності перестройка структури нейросетевих моделей.

ШАГ 2.10. Кінець тіла основного циклу.

ШАГ 3. Поповнення бази даних підсистеми підтримки прийняття оперативних рішень свідченнями про сходах оптимальних умов вирощування для наступного аналізу.

ШАГ 4. Кінець.

Состав и взаимодействие информационных процессов

На рис. 1 приведена общая схема информационной технологии мониторинга температурного поля системы кристалл-расплав в технологическом процессе производства монокристаллов арсенида галлия. Рассмотрим процессы сбора, обработки и передачи информации, показанные на рис. 1.

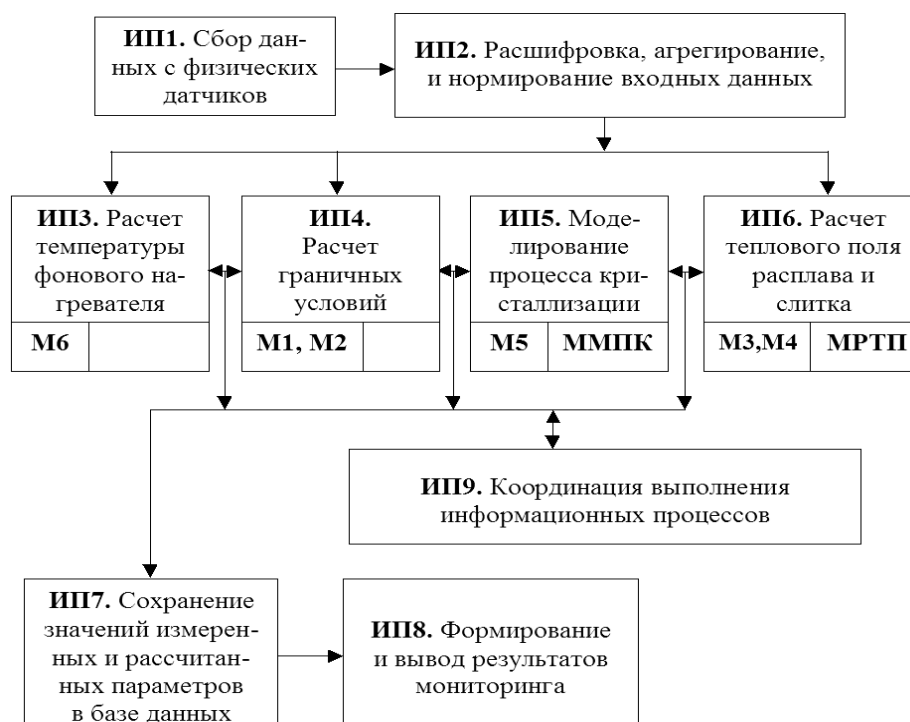


Рис. 1. Общая схема информационной технологии мониторинга температурного поля системы кристалл-расплав в процессе выращивания монокристаллов арсенида галлия

**ИП1.** Сбор данных с физических датчиков. Данный информационный процесс осуществляется программно-аппаратным комплексом существующей АСУ ТП ростовой установки. С физических датчиков и преобразователей, а также с пульта управления поступают значения исходных данных и измеренных значений параметров процесса, таких как скорость вращения тигля, скорость вращения затравки, скорость подъема затравки, масса загрузки, масса выращенной части слитка, температура расплава в контрольной точке, температура основного нагревателя, мощность, потребляемая фоновым нагревателем.

**ИП2.** Полученные от программ-драйверов числовые значения в соответствующих форматах передаются в оперативную память ЭВМ и сохраняются в отдельных массивах базы данных с соответствующим значением дискретного времени  $t_i$ .

**ИП3.** Обработка исходных данных для получения температуры фонового нагревателя [1]. Вычислительная процедура, основанная на математической модели М6, осуществляет следующие операции:

3.1 Прием данных о температуре основного нагревателя, °C (измеряется в реальном времени прямым методом);

3.2 Прием данных о скорости вытягивания (значение задается оператором);

3.3 Прием данных для расчета уровня расплава (масса загрузки; измеренная масса выращенного на данный момент слитка; плотность расплава; радиус тигля; высота слоя герметизатора) и вычисление уровня расплава.

3.4 Прием данных о потребляемой мощности ФН, Вт.

3.5 Расчет текущего значения температуры ФН согласно модели М6.

**ИП4.** Обработка исходных данных для определения граничных условий. Процедура расчета граничных условий осуществляет следующие действия:

4.1 Прием данных о температуре ФН от процесса ИП3.

4.2 Прием данных о температуре расплава от термопары, погруженной в расплав.

4.3 Прием данных о температуре основного нагревателя от термопары.

4.4 Вычисление распределения температуры на стенке тигля (М2), на поверхности герметизатора (М2) и экрана (табличная аппроксимация). Коэффициенты моделей и табличные значения распределения температур корректируются для каждой ростовой установки и хранятся в базе данных подсистемы мониторинга.

**ИП4.** Обработка исходных данных для определения граничных условий. Процедура расчета граничных условий осуществляет следующие действия:

4.1 Прием данных о температуре ФН от процесса ИП3.

4.2 Прием данных о температуре расплава от термопары, погруженной в расплав.

4.3 Прием данных о температуре основного нагревателя от термопары.

4.4 Вычисление распределения температуры на стенке тигля (M2), на поверхности герметизатора (M2) и экрана (табличная аппроксимация). Коэффициенты моделей и табличные значения распределения температур корректируются для каждой ростовой установки и хранятся в базе данных подсистемы мониторинга.

**ІП5.** Определение степени затвердевания расплава в подкристалльной области путем моделирования процесса кристаллизации [2]. Процесс выполняется в период наладочных работ.

5.1. При опускании затравки поверхность раздела фаз считается гладкой, соответствующей геометрическим размерам затравки. При этом ячейки клеточного автомата имеют значения степени затвердевания равные нулю для жидкой фазы и единице – для твердой.

5.2. После вычисления значений температуры на всей расчетной сетке, пересчитываются значения степеней затвердевания ячеек клеточного автомата. Пересчет значений осуществляется исходя из предыдущего состояния ячейки, значений переохлаждения в её окрестности и интегральной оценки состояния соседних ячеек. Ячейки клеточного автомата пространственно совпадают с сеткой расчета температурного поля, однако имеют больший размер. Температура ячейки определяется как среднее арифметическое температур соответствующих точек расчетной сетки.

5.3. После пересчета значений степеней затвердевания ячеек производится пересчет значений коэффициента теплопроводности арсенида галлия в зоне фронта кристаллизации. Значения коэффициента теплопроводности получают исходя из выражения:

$$\mu_i = \mu \cdot \lambda_{ТВ} + (1 - \mu) \cdot \lambda_{Ж},$$

где  $\mu$  – степень затвердевания ячейки нечеткого клеточного автомата;  $\lambda_{ТВ}$  и  $\lambda_{Ж}$  – известные значения коэффициентов теплопроводности твердой и жидкой фазы. Пересчет значений степени затвердевания производится, начиная с верхнего твердого слоя, вниз, к расплаву.

5.4. Производится пересчет температурного поля расплава методом конечных разностей с применением полученных на предыдущей итерации значений коэффициентов теплопроводности ячеек в подкристалльной области.

5.5. Вычисляется разность значений температур, полученных по МКР, на предыдущей и текущей итерациях:  $\Delta T_i^t = T_i^t - T_i^{t-1}$ .

При незначительном абсолютном значении максимальной разности температур  $|\Delta T_i^t| \leq \varepsilon$  процесс пересчета заканчивается, в противном случае продолжается до тех пор, пока значения температур от итерации к итерации не перестанут существенно изменяться.

Полученные значения температур используются в качестве «нижних» граничных условий при расчете температурного поля слитка с помощью нейросетевой модели, позволяющей определить значения температур на поверхности и оси симметрии слитка в контрольных точках.

**ІП6.** Данный информационный процесс является иерархическим. Он содержит два вспомогательных процесса **ІП6.1**, **ІП6.2**. Вначале выполняются процессы нижнего уровня – **ІП6.1** и **ІП6.2**. Используется нейросетевой метод расчета температурного поля расплава (**МРТП**) [3].

**ІП6.1** Расчет значений температуры расплава в заданных точках с учетом влияния конвекции в расплаве. Эту задачу решает специальная нейронная сеть (модель М4). Рассмотрим данную процедуру подробнее.

Структура элементарного блока нейросетевой модели, предназначенной для определения температурного поля расплава и её пространственная конфигурация описаны в работе [3]. Пространственное расположение элементарных ячеек нейронной сети совпадает с узлами расчетной сетки МКР, но их количество ограничено. Вычисление температуры с помощью нейросетевой модели производится в направлении от поверхности расплава по направлению ко дну тигля. В радиальном направлении расчет в верхнем слое сети производится от контрольной точки (точки под поверхностью расплава, температура в которой измеряется при помощи термопары в течении всего процесса выращивания) к оси симметрии системы и к боковой поверхности тигля; в последующих слоях – от боковой поверхности тигля по направлению к оси симметрии системы. Таким образом, расчет начинается с нахождения температуры в точке у поверхности расплава, соответствующей верхнему слою модели, и заканчивается нахождением температуры на оси симметрии системы в точке, соответствующей нижнему слою модели. В предположении осесимметричности системы значения температуры определяется только для радиуса, вторая же половина отображается на мониторе лишь для удобства восприятия оператором, и строится зеркальным отображением относительно оси симметрии системы.

Блоки нейронной сети, находящиеся вблизи кварцевого контейнера с термопарой получают в качестве входных данных измеренную ею температуру.

Так как в течение процесса выращивания уровень расплава в тигле постепенно уменьшается, возникает необходимость в последовательном отключении верхних слоев модели. Отключение происходит при прохождении слоев сети границы раздела расплав-герметизатор. Отключение осуществляется заменой передаточной функции выходных нейронов нулевым значением. Нулевое значение выхода нейрона служит для других процедур сигналом игнорирования.

Поскольку температура расплава в контрольной точке подается на вход блоков только верхнего

слоя сети, то при отключении верхнего слоя в соответствующих блоках следующего слоя, находящегося под отключенным, этот вход автоматически активизируется. Активизация входа происходит путём замены нулевой передаточной функции соответствующего нейрона на линейную функцию.

**ИП6.2.** Расчёт температуры в заданных точках слитка при помощи нейронной сети (М3) [4]. Данная модель используется для расчета температурного поля в слитке на различных стадиях процесса выращивания. Для этого в базе данных подсистемы хранятся массивы весовых коэффициентов для различных стадий процесса выращивания.

Для определения температуры в опорных точках слитка с помощью нейросетевой модели, необходимо задать граничные условия на поверхностях теплового узла, участвующих в лучевом теплообмене с поверхностью кристалла. К ним относятся поверхности экрана, тигля и герметизатора.

На вход нейронной сети подаются распределения температур экрана, зеркала герметизатора, боковой поверхности тигля, температура на фронте кристаллизации, рассчитанная на предыдущей итерации или заданная оператором, а также радиус слитка и значения дискретного отсчета осевой координаты  $z$ . Коэффициент теплоотдачи от поверхности слитка считается постоянным на протяжении всего режима выращивания. Входные значения подаются на скрытый слой нейронной сети с сигмоидальной передаточной функцией. В результате послойных вычислений получаем распределение температур на поверхности и оси симметрии слитка.

Значения температуры на оси слитка, полученные с помощью нейронной сети, рассматриваются как точки с известной температурой при расчёте температуры в остальных точках сетки (информационный процесс ИП6).

**ИП6.** Вычисление параметров температурного поля расплава и слитка методом конечных разностей с использованием значений температуры в контрольных точках от процесса ИП6.2 и сохранение результатов в памяти компьютера при достижении установившихся значений на временной сетке. Вычисление значений температуры проводится в направлении от дна тигля к поверхности герметизатора. Граничные условия для области, примыкающей к тиглю и для поверхности герметизатора, представляют собой граничные условия первого рода.

Поверочный расчёт при отладке системы мониторинга производится по так называемой неявной схеме методом переменных направлений. Регулярный расчет производится путем линейной аппроксимации промежуточных значений по значениям в «контрольных точках» – выходах НС. Это позволяет значительно сократить объем вычислений и получить разумные результаты при счете на грубых сетках и с большим шагом по времени.

Замыкает решение тепловой задачи расчет тепловых потоков излучения и конвекции между поверхностями слитка, экрана, тигля и герметизатора.

Таким образом, информационные процессы ИП4, ИП5, ИП6 позволяют получить результаты расчета температурных полей расплава и слитка с достаточной степенью достоверности, не прибегая при этом к значительным вычислительным затратам.

**ИП7.** Сохранение измеренных и рассчитанных параметров в базе данных. Данный процесс реализуется стандартными средствами языка программирования.

**ИП8.** Формирование и вывод результатов мониторинга в табличном формате. Данный процесс также реализуется стандартными средствами языка программирования.

**ИП9.** Координация выполнения информационных процессов. Для координации выполнения описанных выше информационных процессов используется программа-монитор, которая реализует описанный выше алгоритм мониторинга.

В процессе функционирования системы мониторинга по мере выращивания слитка и уменьшения уровня расплава в тигле необходимо изменять структуру нейронных сетей, вычисляющих температуру в заданных точках расплава и слитка. Переключение структуры нейронных сетей производится по таблице истинности, содержащей булевы правила. Эти правила задаются разработчиком и не изменяются в процессе работы системы на данной ростовой установке и данном типоразмере монокристаллов.

Результаты мониторинга (массивы значений температур и градиентов) поступают на вход подсистемы «Советчик» – специализированной СППР, которая интерпретирует полученные данные в форме сообщений о текущем состоянии процесса выращивания. Помимо данных о тепловых условиях СППР получает информацию и о других параметрах процесса – стадия выращивания, уровень расплава в тигле, длина выращенной части слитка и др. В базе знаний СППР хранятся правила, учитывающие весь набор признаков, характеризующих состояние процесса. Модуль диагностики генерирует сообщение о текущем состоянии процесса и рекомендацию по выходу из критической или нештатной ситуации.

Если оператор обнаруживает нетипичную критическую (или нештатную) ситуацию, происходит дообучение системы. Дообучение осуществляется следующим образом.

В течение всего процесса выращивания данные обо всех измеряемых и контролируемых параметрах процесса сохраняются в отдельной области памяти. После окончания процесса выращивания вся информация о ходе протекания процесса архивируется. По мере поступления данных о качестве выращенного слитка архив снабжается дополнительным файлом, в котором сохраняется оценка результатов выращивания.

По мере накопления архивной информации (по прошествии 20...40 процессов выращивания)

оператор дає команду для обробки накоплених даних. При цьому поповняється і коректується база знань о благоприйнятному і неблагоприйтному протеканні процесу. Виділяються вектори значень параметрів техпроцесу, предшествовавши виникненню нештатних ситуацій (срыву нормального росту), що дозволяє заздалегідь попередити оператора о можливості виникнення нежелательної ситуації.

Після впровадження системи моніторингу і накоплення даних були запропоновані заходи по удосконаленню технологічного процесу вирощування слитків ПІН GaAs, направлені на зменшення температурних напружень в слитках. В частині, запропоновано оптимальний тепловий режим для фоновий нагрівача, поглинутого в рідкий герметизатор при вирощуванні слитків ПІН GaAs. Проведені дослідження показали ефективність запропонованих заходів, а саме – зменшення середньої густоти дислокацій в партіях слитків до значень  $(2,3...2,66) \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ .

### Выводы

Розроблена інформаційна технологія моніторингу температурного поля в процесі вирощування монокристалів арсеніда галію, включаючи комплекс математических моделей і методів, систему взаємозв'язаних інформаційних процесів і комплекс технічних і програмних засобів. Аналіз експериментальних даних дослідження густоти дислокацій в слитках, вирощених на ростовій установці «Арсенід ІМ», обладнаної системою моніторингу температурних полів, показує, що технологія моніторингу і корекції температурного режиму ефективна як засіб зменшення залишкових напружень і, як наслідок, зменшення середньої густоти дислокацій в слитках.

### Литература

1. Оксанич А. П. Виртуальный датчик для мониторинга температуры фоновый нагревателя в тепловом узле установки для выращивания монокристаллов арсенида галлия / А. П. Оксанич, И. В. Шевченко, Ю. А. Краснополянская // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2011. – Вып. 156. – С. 16-26.
2. Шевченко И. В. Моделирование процесса выращивания полупроводниковых материалов на основе нейронной сети и нечеткого клеточного автомата / И. В. Шевченко, Ю. А. Краснополянская, Е. А. Глушков, С. Л. Шкатуло // Новые технологии. Научный вестник КУЭИТУ. – 2010. – № 1(27). – С. 169–177.
3. Оксанич А. П. Метод и нейросетевая модель расчёта температурного поля расплава в процессе выращивания методом Чохральского / А. П. Оксанич, И. В. Шевченко, Ю. А. Краснополянская // Вестник КрНУ имени Михаила Остроградского. Информационные системы и технологии. Математическое моделирование. – 2010. – № 1(72). – Ч. 1. – С. 54-60.
4. Краснополянская Ю. А. Нейросетевая модель расчёта температурного поля слитка в процессе выращивания монокристаллов методом Чохральского / Ю. А. Краснополянская, И. В. Шевченко, Е. А. Глушков, М. В. Репин // Новые технологии. Научный вестник КУЭИТУ. – 2009. – № 2(24). – С. 3–9.

### References

1. Oksanich, A.P., Shevchenko, I.V., Krasnopol'skaya, Yu.A. (2011), "Virtual sensor to monitor the temperature of a background radiator of the heater block of the unit for gallium arsenide single-crystal growing", Automated control systems and automated devices, iss.156, pp. 16–26.
2. Shevchenko, I.V., Krasnopol'skaya, Yu.A., Glushkov, E.A., Shkatulo, S.L. (2010), "Modelling the semiconductor materials growth on the basis of neural network and fuzzy cellular automation", New technologies. Bulletin of KUEITU, no.1 (27), pp. 169–177.
3. Oksanich, A.P. (2010), "The method and neural network model for the melt temperature field calculation at the Czochralski growth process", Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, no.1 (72), pp.54–60.
4. Krasnopol'skaya, Yu.A., Shevchenko, I.V., Glushkov, E.A., Repin, M.V. (2009), "The neural network calculation model for the ingot temperature field during the Czochralski single crystal growth process", New technologies. Bulletin of KUEITU, no. 2(24), pp.3–9.

Рецензія/Peer review : 27.2.2014 р.

Надрукована/Printed : 29.3.2014 р.