

15. Переробка вантажів у морських (річкових) портах (причалах) України у 2012 році [Електронний ресурс] // Стат. бюл. Державна служба статистики України. – К., 2013. – 87 с. – Режим доступу : <http://www.ukrstat.gov.ua>.

16. Стан зовнішньоекономічних відносин з країнами Європейського Союзу за 2012 рік [Електронний ресурс] // Державна служба статистики України, експрес-випуск від 18.03.2013 р. № 08.2-27/38. – Режим доступу : <http://www.ukrstat.gov.ua>.

17. Експорт, імпорт і транзит вантажів за 2012 рік [Електронний ресурс] // Стат. бюл. Державна служба статистики України. – К., 2013. – 82 с. – Режим доступу : <http://www.ukrstat.gov.ua>.

18. Розподіл обсягів експорту–імпорту товарів за видами їх транспортування за 2012 рік [Електронний ресурс] // Державна служба статистики України, експрес-випуск від 28.02.2013 р. № 08.2-27/26. – Режим доступу : <http://www.ukrstat.gov.ua>.



УДК 004:681.518

И. В. Шевченко, кандидат технических наук,
доцент кафедры информационно-управляющих
систем Кременчугского национального
университета им. М. Остроградского
В. М. Левыкин, доктор технических наук,
заведующий кафедрой информационных
управляющих систем Харьковского национального
университета радиоэлектроники

МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОЦЕССА ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Предложена модель информационно-аналитической системы управления качеством процесса выращивания монокристаллов, содержащая подсистему мониторинга температурных полей, многокомпонентную математическую модель процесса выращивания, подсистему поддержки принятия оперативных решений по коррекции режима выращивания, подсистему оптимизации параметров теплового экрана ростовой установки.

Запропоновано модель інформаційно-аналітичної системи управління якістю процесу вирощування монокристалів, яка містить підсистему моніторингу температурних полів, багатоконпонентну математичну модель процесу вирощування, підсистему підтримки прийняття оперативних рішень щодо корекції режиму вирощування, підсистему оптимізації параметрів теплового екрана ростової установки.

The new developed model of information and analytical quality control system for single-crystals growing was presented. The model includes temperature patterns monitoring sub-system, a multicomponent mathematical model of the growing process, a support sub-system for immediate decision making to correct the growth regime and sub-system for the parameters optimization of a heat shield of the growing facility.

Ключевые слова. Информационно-аналитическая система, мониторинг, процесс выращивания.

© И. В. Шевченко, В. М. Левыкин, 2013

Введение. Эффективность реализации бизнес-процессов производства непосредственно связана с оптимизацией технических, технологических и административных решений, что обеспечивает условия получения продукции требуемого качества при минимуме затрат. Фактически это означает, что целям управления качеством подчиняется весь комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок по созданию и модернизации технологических процессов, технологических установок, их оснащению всех видов, информационному и программному обеспечению и автоматизированному регулированию. Решение этих задач может обеспечить объединение разрозненных мероприятий по управлению производственным процессом в единую систему [1].

Понятие “управление качеством” можно определить как “установление, обеспечение и поддержание необходимого уровня качества продукции при ее разработке, производстве и эксплуатации или потреблении, осуществляемое путем систематического контроля качества и целенаправленного воздействия на влияющие на него условия и факторы” [2]. В соответствии с этим термин “управление” трактуется как обобщающее понятие, характеризующее:

- предварительное установление необходимого соотношения цена-качество (анализ и обоснование требуемой совокупности свойств продукции в соответствии с её особенностями и назначением);

- квалитетический аспект – разработку методов оценки первичных и комплексных показателей качества;

- метрологический аспект – обеспечение достоверного измерения и наблюдения количественных и качественных показателей с помощью технических и программных средств;

- непосредственное воздействие на уровень качества с помощью “условий и факторов” (технический и технологический аспекты).

Такой подход положен в основу методологии разработки информационно-аналитической системы управления качеством процесса выращивания (ИАС УКПВ) в производстве монокристаллов полупроводников.

Постановка задачи. В настоящее время лаборатории и отделы технического контроля в производстве монокристаллов в основном инспектируют качество промежуточного и конечного продукта, то есть контрольная функция практически не оказывает влияния на сам процесс выращивания как таковой. Таким образом, управление качеством процесса выращивания и поддержание значений его параметров в пределах технических условий опирается на личный опыт мастера-технолога и нередко осуществляется им на интуитивном уровне. Как правило, с потерей опытных работников на технологической линии резко снижается качество и возрастает брак выпускаемой продукции. Существующее положение объясняется, в первую очередь, слабостью прямого влияния накопленных количественных данных и теоретических знаний о кинетике и динамике процесса выращивания на алгоритмы регулирования технологических параметров в режиме реального времени. С другой стороны, важно подчеркнуть, что по физико-технологическим вопросам производства монокристаллов имеется большой объем исследований, результаты которых необходимо использовать при создании ИАС УКПВ. Целью данной работы является формирование структурной и концептуальной модели ИАС УКПВ как основы для разработки комплекса математических моделей, методов и информационных технологий мониторинга и оптимизации процесса выращивания монокристаллов полупроводников.

Результаты исследования. Современные системы управления ростовыми установками должны обеспечивать воспроизводимость результатов технологических процессов при

достаточно высоких значениях показателей качества выращенных кристаллов, которые определяются техническими условиями и требованиями заказчика. Это может быть достигнуто только путем использования в контурах управления математических моделей с настраиваемыми параметрами, систем оперативной идентификации этих моделей и систем оптимизации режимов. При таком подходе влияние “человеческого фактора” сводится к минимуму.

Вопросу создания методов и моделей для систем управления процессом выращивания уделялось большое внимание с самого начала промышленного производства монокристаллов полупроводников. Подробный анализ развития автоматизации управления процессом выращивания монокристаллов по методу Чохральского представлен в работе [3].

Общие и частные подходы к проектированию автоматизированных систем управления процессом выращивания слитков по методу Чохральского достаточно подробно показаны в работах [4, 5], а принципы построения системы управления технологическим процессом выращивания с поддержанием заданных диаметра и температуры расплава изложены в [6]. Примером реализации этих подходов и принципов может служить автоматизированная система, описанная в работе [7]. В этой двухуровневой системе реализована настройка всех локальных контуров регулирования параметров процесса от центральной ЭВМ. При этом обеспечена возможность с помощью одной ЭВМ управлять работой нескольких установок; информационная база системы основана на использовании промышленных СУБД; обеспечена информационная связь с другими технологическими участками производства; заложена возможность идентификации управляемых процессов и адаптации параметров используемых моделей.

Непосредственно на одной ростовой установке для выращивания GaAs система управления контролирует и отображает соответствующие параметры технологического процесса. Однако контролируемые в существующих системах параметры лишь косвенно влияют на качество выращиваемого слитка. Факторами, прямо влияющими на возникновение структурных дефектов, являются, прежде всего, температурные напряжения в выращенном слитке, несимметричность теплового поля ростовой камеры, изменение формы фронта кристаллизации, происходящее из-за неконтролируемых колебаний температуры расплава. Поэтому с точки зрения технологов крайне желательно контролировать температурное поле в расплаве на всех стадиях выращивания. В частности, для обеспечения требуемого уровня структурного совершенства монокристалла необходим контроль осевых и радиальных температурных градиентов в слитке и в расплаве, особенно в зоне фронта кристаллизации. Однако существующие методы и системы контроля процесса выращивания не позволяют осуществить эти функции. Для решения этой проблемы необходимо использовать современные информационные технологии.

Разработка модели структуры ИАС УКПВ

При разработке концептуальной модели системы следует определить назначение и цели функционирования ИАС УКПВ, структуру системы, набор решаемых функциональных задач.

Назначение ИАС УКПВ – служить организующим началом всего комплекса мероприятий, обеспечивающих производство продукции с заданными свойствами. Цель функционирования системы – установление и стабилизация оптимального количественного уровня всех факторов, влияющих на качество конечного продукта в процессе выращивания монокристаллов.

В общем виде модель структуры ИАС УКПВ можно представить кортежем:

$$M_{\text{ис}} = \langle F, OK_{\text{ис}} \rangle,$$

где F – комплексы функциональных задач; $OK_{\text{ис}}$ – обеспечивающие комплексы.

Применительно к рассматриваемой проблеме создания ИАС УКПВ детализируем содержание отдельных комплексов. Тогда модель структуры будет иметь следующий вид:

$$M_{\text{ис}} = \langle F(SM, SAD, SO), ИК, МК (MQ, MM), АК, ПК, ТК, ОпК \rangle,$$

где F – функциональные задачи подсистем SM , SAD и SO ;

SM – функциональная подсистема комплекса задач мониторинга температурных параметров процесса выращивания в реальном времени, включая виртуальный мониторинг температурного поля;

SAD – функциональная подсистема комплекса задач поддержки принятия оперативных решений по изменению режима процесса выращивания; данная подсистема обеспечивает также связь ИАС УКПВ с подсистемой ТЭП основной ИУС предприятия и с системой АСУ ТП выращивания монокристаллов;

SO – функциональная подсистема комплекса задач оптимизации геометрических параметров теплового экрана;

$ИК$ – информационный комплекс – базы данных значимых технологических параметров и база знаний о ситуациях, возникающих при корректировке параметров и хода процесса выращивания;

$МК$ – комплекс моделей (представлен наборами MQ и MM);

MQ – модель качества продукта в виде совокупности показателей, характеризующих физические свойства монокристаллов;

MM – многокомпонентная модель – комплекс математических моделей, описывающих физические процессы выращивания. Данные модели необходимы для решения задачи мониторинга процесса выращивания;

$АК$ – комплекс алгоритмов решения задач мониторинга и коррекции процесса выращивания в соответствии с локальными критериями качества разных сторон технологического процесса и глобальным критерием качества, а также прогноза качества монокристалла;

$ПК$ – комплекс инструментальных программных средств, реализующих функциональные задачи ИАС УКПВ;

$ТК$ – комплекс инструментальных средств измерения и контроля информативно-значимых параметров процесса выращивания;

$ОпК$ – организационный комплекс ИАС УКПВ, то есть организационные принципы и документы, регламентирующие контроль технологического процесса и уровня качества продукции.

Структурная схема ИАС УКПВ показана на рис. 1. Комплексы функциональных задач ИАС УКПВ определяются для каждой подсистемы.

1. Комплекс задач подсистемы мониторинга температурных параметров процесса выращивания предназначен для обеспечения наблюдаемости температурных параметров процесса путем косвенного многоточечного измерения температуры в слитке и в подкристалльной области и выдачи результатов измерения на монитор мастера-технолога в табличном и графическом виде. В комплекс входят следующие задачи:

- задача контроля температуры фонового нагревателя;
- задача контроля процесса кристаллизации;
- задача контроля температурного поля расплава и слитка.

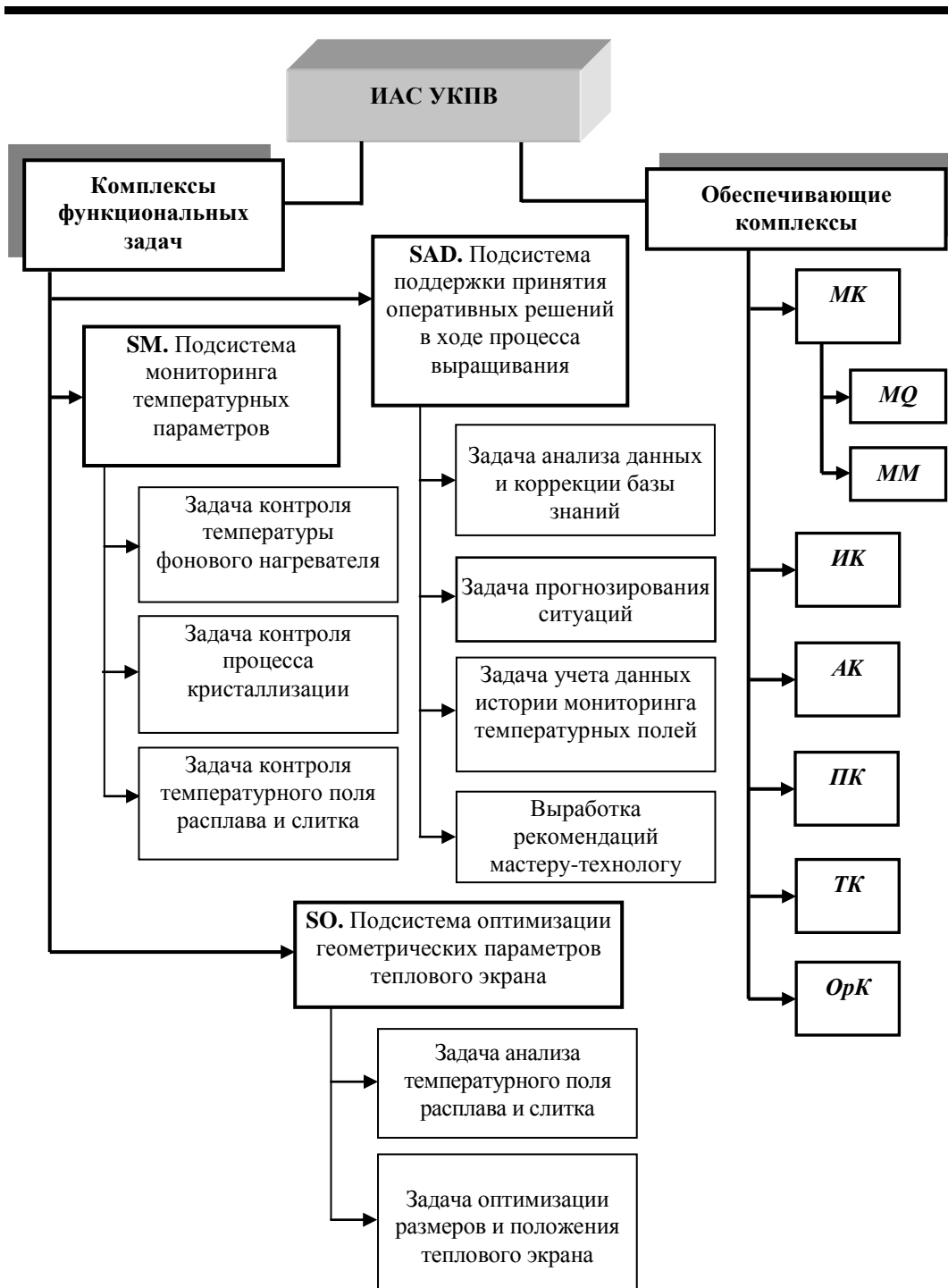


Рис. 1. Структурная схема ИАС УКПВ

Комплекс задач решается непосредственно на ростовой установке. Продолжительность решения задач обусловлена продолжительностью процесса выращивания и составляет от 4 до 10 часов. Периодичность решения задач определяется периодичностью запуска процессов выращивания на данной установке. Автоматизированное решение задач может быть прекращено по желанию мастера при обнаружении нештатной ситуации.

В процессе решения данного комплекса задач подсистема мониторинга связана информационными потоками с комплексом задач подсистемы поддержки принятия оперативных решений в ходе процесса выращивания (SAD). Информация о температурных полях и температурных градиентах в слитке и в подкристальной области обрабатывается в SAD, которая генерирует в случае необходимости сообщения и рекомендации для мастера-технолога.

Входной информационный поток комплекса задач содержит:

1. Исходные данные для тепловых расчетов, в том числе заданный диаметр слитка, массу загрузки, диаметр тигля, скорости вращения затравки и тигля, значения теплотехнических характеристик материалов и т. п.

2. Первичные данные, полученные от физических датчиков, в том числе температуру основного нагревателя, мощность, потребляемую фоновым нагревателем, температуру расплава под слоем герметизатора, текущую массу слитка, скорость вертикального перемещения затравки и штока тигля и др.

Выходной информационный поток комплекса задач содержит массивы значений температуры в заданных точках расплава и слитка, массивы осевых и радиальных градиентов температуры в подкристальной области и в слитке.

Комплекс задач подсистемы поддержки принятия оперативных решений (SAD) в процессе выращивания предназначен для обеспечения мастера-технолога советами и рекомендациями по ведению процесса выращивания на разных стадиях. В комплекс входят следующие задачи:

- анализ данных мониторинга и истории процесса и коррекция базы знаний;
- учет данных истории мониторинга температурных полей;
- прогнозирование развития ситуации в процессе выращивания;
- выработка рекомендаций мастеру-технологу.

Комплекс задач решается непосредственно на рабочем месте мастера-технолога. Периодичность и продолжительность решения задач и условия, при которых прекращается решение комплекса задач, полностью совпадают с условиями, сформулированными для комплекса задач № 1.

В процессе решения второго комплекса задач подсистема поддержки принятия оперативных решений является получателем выходного информационного потока подсистемы мониторинга температурных полей. Информация о температурных полях и температурных градиентах в слитке и в подкристальной области обрабатывается в SAD, которая генерирует в случае необходимости сообщения и советы для мастера-технолога. Кроме того, подсистема SAD получает необходимые данные от подсистем АСУТП процесса выращивания.

Входной информационный поток комплекса задач содержит массивы значений температуры в заданных точках расплава и слитка, массивы осевых и радиальных градиентов температуры в подкристальной области и в слитке, значения скоростей вращения тигля и затравки.

Выходной информационный поток SAD содержит советы и рекомендации для мастера-технолога.

3. Комплекс задач подсистемы оптимизации геометрических параметров теплового экрана (SO) предназначен для определения диаметра, высоты и расположения теплового экрана

относительно слитка в ходе технологической подготовки производства монокристаллов и тем самым оптимизации тепловых условий в зоне остывания слитка. В комплекс входят:

- задача анализа температурного поля расплава и слитка;
- задача оптимизации размеров и положения теплового экрана.

Комплекс задач решается в отделе технологической подготовки производства на рабочей станции инженера-технолога. Периодичность решения задач определяется производственным планом по выпуску монокристаллов различного диаметра. Продолжительность решения задач в зависимости от мощности рабочей станции составляет 1...5 мин. Решение комплекса задач возможно только автоматизированным способом.

Связь данного комплекса задач с другими комплексами косвенная, решение таких комплекса задач не зависит от результатов решения задач описанных выше комплексов, но оно непосредственно влияет на качество выпускаемой продукции.

Входной информационный поток комплекса задач формируется из значений геометрических параметров теплового узла и слитка, значений теплофизических параметров материалов, табличных значений распределения температуры на стенках тигля, заданных констант – значений целевой функции минимизации среднеквадратичных значений температурных градиентов вдоль оси слитка.

Выходной информационный поток комплекса задач содержит рассчитанные значения размеров теплового экрана и координаты его положения относительно слитка и расплава.

Многокомпонентная модель решения задач мониторинга процесса выращивания монокристаллов

Для описания связей элементов сложной системы, какой является процесс выращивания монокристаллов, разработана многокомпонентная и многосвязная модельная структура, отражающая взаимосвязь физических явлений и внешних воздействий. Этот подход позволяет дополнять и уточнять описание технологической системы без качественного изменения структуры модели, применять различные математические и феноменологические модели для описания различных элементов системы, использовать различные уровни детализации для исследования внутренних процессов и свойств с гарантированным сохранением общей целостности. Такая декомпозиция позволяет сделать структуру более гибкой и прозрачной.

Обобщенную структуру многокомпонентной модели можно описать матрицей, показанной в табл. 1. Зарегистрированные системой мониторинга входные сигналы X_i , $i = \overline{1, m}$ – это данные, характеризующие конкретную ситуацию на объекте управления. Система мониторинга должна не только непрерывно отслеживать изменения текущей ситуации, но и достоверно, с расчетом на опережение, предсказывать дальнейший ход и результат контролируемого процесса.

Выходы системы F_j , $j = \overline{1, n}$ – это конечное множество вторичных данных, полученных при текущих значениях входных сигналов X_i . Связи между данными X_i и выходами F_j осуществляют преобразующие модели M_i . Необходимое конкретное содержание выхода F_j обеспечивается не только конечным числом s_j (количеством активных элементов в столбце j), но и подмножествами выходных сигналов моделей Y_{ij} , участвующих в формировании выхода F_j .

Модель M_i , описывающую связь вектора входных параметров X_i и выходной величины F_j , представим отображением:

$$M_i: X_i \rightarrow F_j.$$

В общем случае каждая модель M_i может быть представлена матрицей, показанной в табл. 2. Здесь x_i^i – элемент вектора X_i ; Y_k^i – k -е подмножество выходов модели M_i ; I_{ik} – информационное (смысловое) содержание, отражающее связь параметра x_i^i с композицией выходов Y_k модели M_i .

В каждом столбце матрицы имеется g_k активных элементов ($g_k \leq r$). Отдельные модели связаны между собой так же, как и физические процессы, которые они воспроизводят.

Таблица 1

Структурная матрица взаимосвязи исходных данных, моделей и вторичных параметров

Данные	Модели	Выходы					
		F_1	F_2	–	F_j	–	F_n
X_1	M_1	Y_{11}	Y_{12}	–	Y_{1j}	–	Y_{1n}
X_2	M_2	Y_{21}	Y_{22}	–	Y_{2j}	–	Y_{2n}
–	–	–	–	–	–	–	–
X_i	M_i	Y_{i1}	Y_{i2}	–	Y_{ij}	–	Y_{in}
–	–	–	–	–	–	–	–
X_m	M_m	Y_{m1}	Y_{m2}	–	Y_{mj}	–	Y_{mn}

Таблица 2

Структурная матрица модели M_i

Данные	Выходы модели M_i					
	Y_1^i	Y_2^i	–	Y_k^i	–	Y_p^i
x_1^i	I_{11}	I_{12}	–	I_{1k}	–	I_{1p}
x_2^i	I_{21}	I_{22}	–	I_{2k}	–	I_{2p}
–	–	–	–	–	–	–
x_j^i	I_{j1}	I_{j2}	–	I_{jk}	–	I_{jp}
–	–	–	–	–	–	–
x_r^i	I_{r1}	I_{r2}	–	I_{rk}	–	I_{rp}

В контексте проблемы улучшения наблюдаемости процесса выращивания монокристаллов многокомпонентная модель используется как основа подсистемы мониторинга процесса выращивания.

Обеспечения ИАС УКПВ

ИАС УКПВ имеет информационное, математическое, программное, техническое и организационное обеспечение.

В информационное обеспечение ИАС УКПВ входят:

1. Комплект нормативных документов, регламентирующих параметры качества монокристаллов.
2. База данных об информативно-значимых технологических параметрах, достаточно полно отражающих существо процессов технологии в их связи с уровнем качества получаемой продукции.
3. База знаний, позволяющая осуществлять поддержку принятия оперативных решений по корректировке параметров и хода процесса выращивания.

В математическое обеспечение ИАС УКПВ входят:

1. Многокомпонентная модель процесса выращивания.
2. Комплекс математических моделей для оптимизации параметров ростовой установки.
3. Математическая модель для краткосрочного прогноза значения диаметра слитка.
4. Алгоритмы моделирования и управления процессом выращивания в соответствии

с локальными критериями качества разных сторон технологического процесса и глобальным критерием качества.

Программное обеспечение ИАС УКПВ представляет собой комплекс программных средств, реализующий решение функциональных задач, перечисленных выше, в том числе мониторинг процесса выращивания; поддержку принятия оперативных решений в ходе процесса и оптимизацию геометрических параметров теплового экрана.

В техническое обеспечение ИАС УКПВ входят:

1. Комплекс инструментальных средств измерения и контроля информативно значимых параметров процесса выращивания и показателей качества монокристалла.

2. Технические средства автоматизированного управления процессом выращивания для получения продукции заданного качества.

Организационное обеспечение ИАС УКПВ представляет собой организационные принципы осуществления производственного контроля процессов технологии и оценки уровня качества продукции.

Выводы. Разработана модель информационно-аналитической системы управления качеством процесса выращивания монокристаллов, содержащая базу знаний, многокомпонентную математическую модель процесса выращивания, систему мониторинга параметров процесса выращивания в реальном времени, включая виртуальный мониторинг температурного поля, систему поддержки принятия оперативных решений по изменению режима выращивания. Информационно-аналитическая система позволяет реализовать следующий комплекс основных функциональных задач:

1. Анализ температурных полей расплава и слитка.

2. Прогноз тенденции изменения ситуации в процессе выращивания.

3. Поддержку принятия оперативных решений в процессе выращивания.

4. Оптимизацию геометрических параметров теплового экрана ростовой установки.

Внедрение ИАС УКПВ позволяет повысить качество процесса выращивания с точки зрения выхода годной продукции и обеспечения её конкурентоспособности на международных рынках.

Литература

1. Чернышов Е. М. Концепция, проблематика и структура современной системы управления качеством в производстве строительных материалов и изделий / Е. М. Чернышов // Известия КГАСУ. – 2005. – № 2 (4). – С. 11–14.

2. Брячихин А. М. Управление качеством продукции строительства: методологические аспекты / Брячихин А. М. – М. : Стройиздат, 1982. – 176 с.

3. Суздаль В. С. Системы управления процессами получения монокристаллов из расплава / В. С. Суздаль, П. Е. Стадник // Функциональные материалы для науки и техники. – 2001. – С. 514–526.

4. Riedling K. Autonomous liquid encapsulated Czochralski (LEC) growth of single crystal GaAs by “intelligent” digital control / K. Riedling // Journal of Crystal Growth. – 1988. – № 89. – P. 435–446.

5. Gevelber M. Dynamics and control of the Czochralski process. II. Objectives and control structure design / M. Gevelber, G. Stephanopoulos, M. Wargo // Journal of Crystal Growth. – 1988. – № 91. – P. 199–217.

6. Nalbandyan H. G. Possibility of programming and optimal control of growth in the Czochralski technique / H. G. Nalbandyan // Journal of Crystal Growth. – 1984. – Vol. 67. – № 1. – P. 115–118.

7. Оксанич А. П. Архітектура і функціональність дворівневої системи управління вирощуванням злитків кремнію / А. П. Оксанич, В. Р. Петренко, С. Е. Притчин // Радіоелектроніка та інформатика. – 2007. – № 4 (39). – С. 49–53.