

В статті представлено комплекс інформаційних технологій, що забезпечують моніторинг процесу вирощування монокристалів, підтримку прийняття рішень з корекції режиму вирощування та оптимізацію геометричних параметрів теплового екрана ростової установки. Реалізація інформаційних технологій дозволила знизити втрати від зривів процесу вирощування і скоротити витрати на технічну підготовку виробництва

Ключові слова: інформаційна технологія, вирощування монокристалів, моніторинг, підтримка прийняття рішень, оптимізація

В статье представлен комплекс информационных технологий, обеспечивающих мониторинг процесса выращивания монокристаллов, поддержку принятия решений по коррекции режима выращивания и оптимизацию геометрических параметров теплового экрана ростовой установки. Реализация информационных технологий позволила снизить потери от срывов процесса выращивания и сократить расходы на техническую подготовку производства

Ключевые слова: информационная технология, выращивание монокристаллов, мониторинг, поддержка принятия решений, оптимизация

УДК 004.384:681.323

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОЦЕССА ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

И. В. Шевченко

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра информационно-управляющих систем

Кременчугский национальный университет

им. Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Украина, 39600

E-mail: silver055@mail.ru

1. Введение

Эффективность современного производства зависит от принимаемых технических, технологических и административных решений, оптимизация которых обеспечивает условия получения продукции требуемого качества при минимуме затрат. Именно качество продукта, а, следовательно, и технологического процесса, обеспечивает высокую конкурентоспособность производственного предприятия. Это означает, что целям управления качеством должен подчиняться весь комплекс исследовательских и опытно-конструкторских работ по модернизации технологических процессов, технологических установок, их систем управления, информационного и программного обеспечения. Все сказанное в полной мере относится к процессу выращивания монокристаллов методом Чохральского. Процесс выращивания является сложным сочетанием тепловых и механических явлений и отличается нестационарностью [1, 2]. Для обеспечения требуемого уровня структурного совершенства монокристалла необходим контроль осевых и радиальных температурных градиентов в слитке и в расплаве, особенно в зоне фронта кристаллизации [2, 3].

Однако существующие методы и системы контроля процесса выращивания не позволяют осуществить эти функции.

Таким образом, разработка информационных технологий мониторинга и управления качеством процесса выращивания монокристаллов полупроводников является актуальной задачей.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Для эффективного управления процессом выращивания необходимо использовать интеллектуальные технологии [4]. Информационная технология мониторинга процесса выращивания предполагает косвенное измерение параметров температурного поля, так как прямые измерения в расплаве и слитке невозможны. В работе [5] показана возможность применения нейронных сетей для тепловых расчетов. В работе [6] предложена информационная технология мониторинга температурных полей в процессе выращивания монокристаллов, в которой для расчета температуры в расплаве используется нейронная сеть.

На стадии технической подготовки производства монокристаллов нового типоразмера необходимо решать задачу выбора геометрических параметров тепловых экранов для оптимизации теплового режима на стадии остывания выращенной части слитка. Эмпирический подбор параметров экрана связан с проведением физических или численных экспериментов. В работе [7] предложена информационная технология оптимизации геометрических параметров теплового экрана, позволяющая избежать дорогостоящих физических экспериментов. Работы [8, 9] открывают путь применения нечетких моделей в распознавании ситуаций и принятия оперативных управляющих решений.

Таким образом, проблему мониторинга и управления качеством процесса выращивания можно решить путем разработки и внедрения специализированных прикладных информационных технологий (ИТ).

3. Цель и задачи работы

Цель работы – разработка информационной технологии поддержки принятия оперативных решений по коррекции режима процесса выращивания и объединение в единый комплекс трех информационных технологий – ИТ мониторинга температурных полей [6], ИТ оптимизации геометрических параметров тепловых узлов установок [7], ИТ диагностики и поддержки принятия оперативных решений по коррекции режима процесса выращивания, модели распознавания для которой предложены в работе [10].

Для разработки прикладной ИТ необходимо определить состав информационной базы, комплекс моделей и методов преобразования данных, состав и взаимодействие информационных процессов.

4. Информационная технология поддержки принятия оперативных решений

Информационная технология поддержки принятия оперативных решений по коррекции режима процесса выращивания монокристаллов объединяет в себе модели и алгоритмы, осуществляющие распознавание ситуации, выдачу рекомендаций, архивирование данных истории процесса и коррекцию баз данных и знаний.

База данных подсистемы диагностики процесса выращивания монокристаллов включает ряд параметров, значения которых вводятся оператором или передаются из измерительной подсистемы АСУ ТП процесса выращивания:

1. Исходные данные по физическим параметрам объекта мониторинга:

- масса загрузки; масса герметизатора;
- заданный диаметр слитка;
- радиус затравки; длина затравки;
- скорость вращения затравки;
- скорость вращения тигля;
- диаметр тигля; высота тигля;
- внутренний диаметр экрана;
- высота экрана; плотность полупроводникового материала в твердом состоянии;
- плотность полупроводникового материала в расплаве;
- теплопроводность полупроводникового материала в твердом состоянии; теплопроводность полупроводникового материала в расплаве;
- излучательная способность слитка;
- излучательная способность герметизатора (V_2O_5);
- температура плавления полупроводникового материала;
- кристаллографическое направление плоскости роста.

2. Первичные данные, полученные от физических датчиков в ходе технологического процесса: температура основного нагревателя; мощность фонового нагревателя; скорость перемещения штока затравки; скорость перемещения штока тигля; температура расплава под слоем герметизатора; текущая масса слитка.

3. Вторичные данные – результаты косвенных измерений: температура фонового нагревателя; уровень

расплава в тигле; массив значений температуры на поверхности герметизатора; массив значений температуры на поверхности тигля; текущий диаметр слитка; текущая длина слитка.

4. Промежуточные данные: теплопроводность GaAs в зоне фронта кристаллизации; температура в заданных точках расплава; температура в заданных точках кристалла; эффективный коэффициент теплоотдачи с поверхности слитка; номер стадии процесса выращивания.

5. Выходные данные подсистемы мониторинга: массив распределения температур в расплаве; массив распределения температур в кристалле; радиальные температурные градиенты в зоне фронта кристаллизации; осевые температурные градиенты в слитке.

6. Признаки ситуаций: тенденция отклонения текущего значения диаметра слитка; тенденция отклонения температуры основного нагревателя; тенденция отклонения температуры фонового нагревателя; тенденция отклонения скорости вытягивания; радиальный градиент на уровне +1 см над уровнем расплава; осевой градиент на фронте кристаллизации; осевой градиент в слитке на уровнях от 1 см до 12 см; неравномерность осевого градиента в слитке на уровнях от 1 см до 12 см.

База знаний системы диагностики процесса выращивания содержит:

1. Перечень ситуаций подлежащих распознаванию, а именно:

- штатная ситуация;
- растет риск ухода диаметра слитка за пределы допуска;
- уход диаметра за пределы допуска;
- растет риск увеличения плотности дислокаций;
- вероятность недопустимого увеличения плотности дислокаций превысила заданный порог;
- растет риск замедления или остановки процесса кристаллизации;
- растет риск повышения нестабильности значения радиуса слитка, риск разложения кристалла;
- неисправность в АСУ ТП.

2. Продукционные нечеткие правила распознавания ситуаций.

3. Массивы параметров функций принадлежности и весовых коэффициентов элементарных посылок для системы нечеткого распознавания ситуации.

4. Продукционные правила генерации рекомендаций по коррекции режима выращивания.

Комплекс математических методов и моделей подсистемы содержит:

1. Модель структуры СППР по коррекции режима процесса выращивания.

2. Вербальную модель проблемной ситуации в предметной области – описание ситуаций и их признаков, описание причинно-следственных связей;

3. Модель качества конечного продукта в виде совокупности показателей, характеризующих физические свойства монокристалла (технические условия);

4. Модели преобразования первичных данных в значения признаков ситуации, а именно [10]:

- модель тренда отклонения текущего значения диаметра слитка (M1);
- модель тренда отклонения температуры основного нагревателя (M2);

- модель тренда отклонения температуры фонового нагревателя (М3);
- модель тренда отклонения скорости вытягивания (М4);
- нечеткая модель распознавания ситуаций (М5).
- продукционная модель для выбора решений для коррекции режима процесса выращивания (М6).

Определим информационные процессы (ИП) и схему информационной технологии (рис. 1).

ИП1. Предварительная обработка данных, полученных от системы мониторинга. Производится нормирование данных и агрегирование – распределение данных по рабочим массивам системы диагностики.

ИП2. Преобразование данных в признаки ситуаций – модели М1–М4. Процедуры вычисления скользящих средних с учётом трех последних замеров и знака результата.

ИП3. Распознавание ситуаций. Используется нечеткая модель распознавания М5 и база знаний по диагностике БЗ.1.

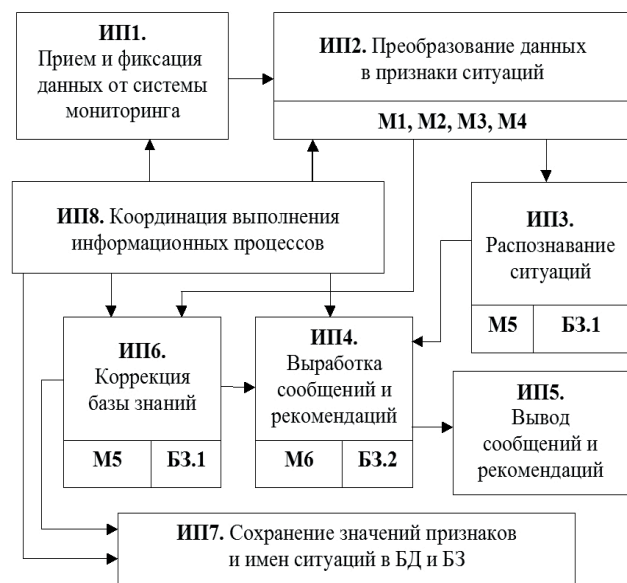


Рис. 1. Схема информационной технологии поддержки принятия оперативных решений

Процесс выполняется по следующему алгоритму:

ШАГ 1. Фиксация текущих значений признаков ситуаций.

ШАГ 2. Расчет текущих значений степеней принадлежности для признаков ситуаций и фиксация результатов фазификации в рабочей матрице логического вывода.

ШАГ 3. Вычисление степеней истинности левых частей правил в БЗ диагностики ситуаций с учетом весовых коэффициентов каждой посылки каждого правила.

ШАГ 4. Аккумуляция результатов, полученных на шаге 3. Определение правила, имеющего наибольшую степень истинности.

ШАГ 5. Вычисление числового и лингвистического значения степени критичности ситуации.

ШАГ 6. Генерация сообщения для оператора с указанием текущей ситуации и степени критичности.

ШАГ 7. Конец.

ИП4. Выработка рекомендаций. Используется модель вывода М6.

Процесс выполняется по следующему алгоритму:

ШАГ 1. Фиксация результатов распознавания ситуации.

ШАГ 2. Вычисление степеней истинности левых частей правил в БЗ по выдаче рекомендаций.

ШАГ 3. Определение правила, имеющего наибольшую степень истинности.

ШАГ 4. Выдача рекомендации для оператора установки в соответствии с выбранным правилом.

ШАГ 5. Конец.

ИП5. Вывод сообщений и рекомендаций. Алгоритм вывода стандартный.

ИП6. Коррекция баз знаний.

ИП7. Сохранение значений признаков и имен ситуаций в БД и БЗ.

ИП8. Координация выполнения процессов ИП1–ИП7.

Таким образом, разработана информационная технология поддержки принятия оперативных решений по коррекции режима выращивания монокристаллов. Информационная технология оптимизации геометрических параметров теплового экрана реализуется на этапе технологической подготовки производства и предшествует информационным технологиям мониторинга тепловых полей и поддержки принятия оперативных решений в ходе процесса выращивания [3].

5. Связи информационных технологий

Логическая связь между информационными технологиями мониторинга и поддержки принятия оперативных решений показана на рис. 2.

Информационная технология мониторинга температурных параметров процесса выращивания (ИТМТП) предназначена для контроля температурных параметров процесса путем косвенного многократного измерения температуры в слитке и в подкритической области и выдачи результатов измерения на монитор оператора-технолога в табличном виде [1]. Кроме того, ИТМТП обеспечивает входными данными информационную технологию поддержки принятия оперативных решений по коррекции процесса выращивания (ИТППОР).

Входной информационный поток ИТМТП содержит:

1. Исходные данные для тепловых расчетов, в том числе заданный диаметр слитка, масса 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 температура основного нагревателя, мощность, потребляемая фоновым нагревателем, температура расплава под слоем герметизатора, текущая масса слитка, скорость вертикального перемещения затравки и штока тигля и др.

В ИТМТП реализованы следующие процессы:

- фиксация, первичная обработка и агрегирование данных прямых измерений;
- вычисление параметров температурных полей;
- вывод данных на монитор оператора;
- сохранение данных мониторинга в БД.

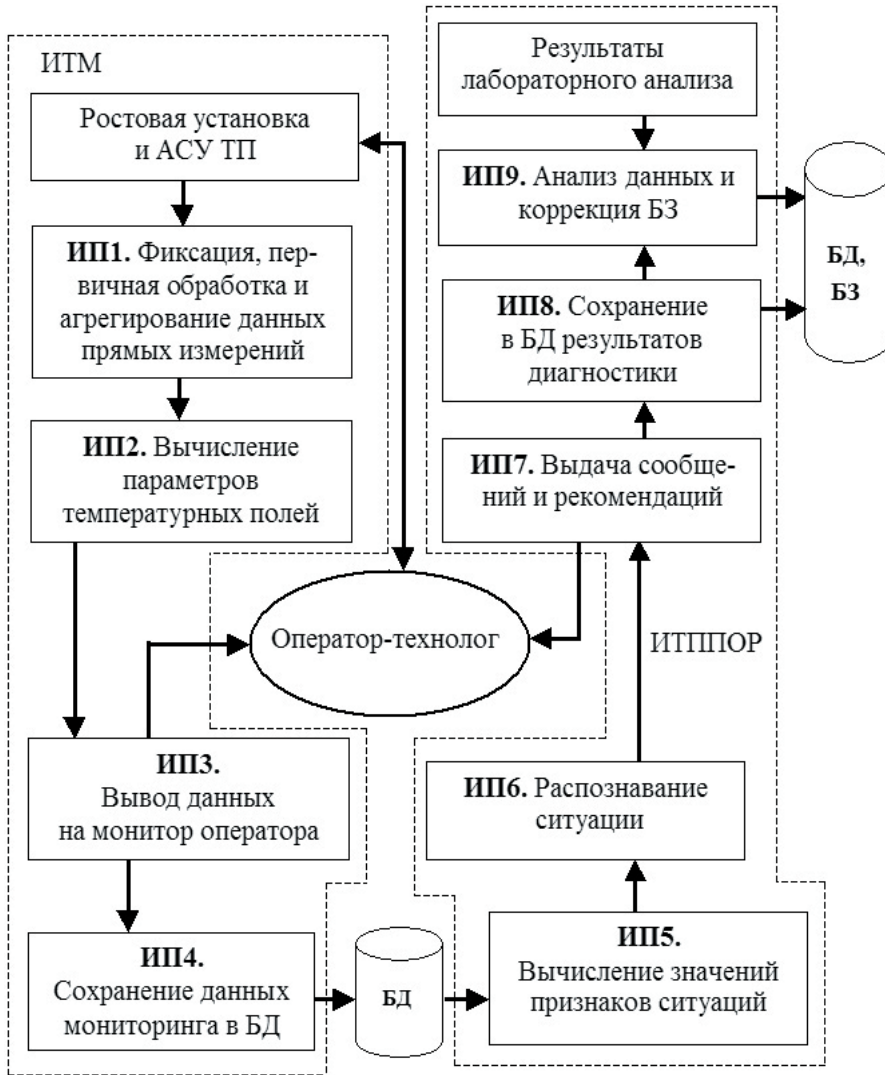


Рис. 2. Схема логических связей информационных технологий мониторинга (ИТМ) и поддержки принятия оперативных решений (ИТППОР)

Выходной информационный поток ИТМТП содержит массивы значений температуры в заданных точках расплава и слитка, массивы осевых и радиальных градиентов температуры в подкристалльной области и в слитке. Эти данные фиксируются в БД и являются входными для ИТППОР.

ИТППОР предназначена для обеспечения оператора-технолога сообщениями и рекомендациями по ведению процесса выращивания на разных стадиях.

В ИТППОР реализованы следующие процессы:

- прием данных от подсистемы мониторинга;
- вычисление значений признаков ситуаций;
- распознавание ситуации;

- выдача сообщений и рекомендаций;
- сохранение в БД результатов диагностики;
- анализ данных и коррекция БЗ.

На этапе анализа данных используются не только результаты диагностики, но и результаты лабораторного анализа качества слитка – плотность дислокаций в разных сечениях слитка и дисперсия отклонений диаметра цилиндрической части.

Описанные выше информационные технологии реализованы в информационно-аналитической системе управления качеством процесса выращивания (ИАС УКПВ). ИАС имеет подсистемы «Мониторинг», «Советчик» и «Экран». Схема взаимодействия подсистем с процессом выращивания монокристаллов и конечными пользователями показана на рис. 3.

Подсистема «Экран» реализует информационную технологию оптимизации геометрических параметров теплового экрана и входит в АРМ технолога.

Подсистема «Мониторинг» реализует информационную технологию мониторинга температурных параметров процесса выращивания.

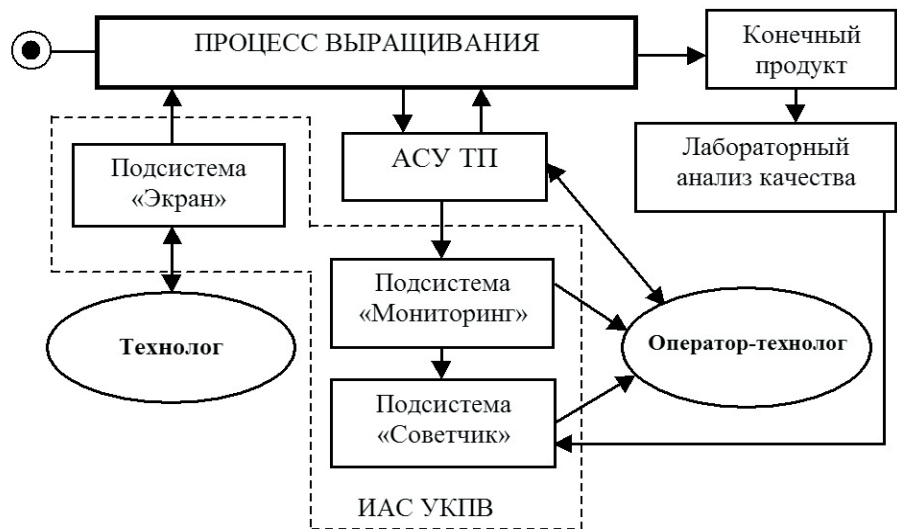


Рис. 3. Схема взаимодействия ИАС УКПВ с процессом выращивания монокристаллов и конечными пользователями

Подсистема «Советчик» реализует информационную технологию поддержки принятия оперативных решений в ходе процесса выращивания.

После внедрения ИАС УКПВ зафиксировано уменьшение расхода электроэнергии, материальных ресурсов, трудозатрат и потерь прибыли на единицу готовой продукции за счет снижения количества нештатных ситуаций и соответствующего снижения доли бракованной продукции в производстве слитков арсенида галлия.

Кроме того, снижены расходы на технологическую подготовку производства за счет сокращения количества натуральных экспериментов по подбору геометрических параметров теплового узла.

6. Выводы

Разработан комплекс информационных технологий управления качеством процесса выращивания монокристаллов полупроводников, включающий информационную технологию мониторинга температурных полей, информационную технологию поддержки принятия оперативных решений по коррекции режима процесса выращивания и информационную технологию оптимизации геометрических параметров теплового экрана ростовой установки.

Реализация информационных технологий позволила снизить потери от срывов процесса выращивания и сократить расходы на экспериментальные работы по подбору геометрических параметров тепловых экранов.

Литература

1. Crowley, A. A. Modelling of the growth of GaAs by LEC Technique [Text] / A. A. Crowley, E. I. Stern, D. I. Hurle // Thermal distribution in the crystal. J. Cryst. Growth. – 1991. – № 108 (2). – P. 627–636.
2. Nalbandyan, H. G. Possibility of programming and optimal control of growth in the Czochralski technique [Text] / H. G. Nalbandyan // J. Crystal Growth. – 1984. – № 67 (1). – P. 115–118.
3. Satunkin, G. A. Mathematical modeling and control system design of Czochralski and liquid encapsulated Czochralski process: the basic low order mathematical model [Text] / G. A. Satunkin // J. of Crystal Growth. – 1995. – Vol. 154, № 1-2. – P. 172–188.
4. Riedling, K. Autonomous liquid encapsulated Czochralski (LEC) growth of single crystal GaAs by “intelligent” digital control [Text] / K. Riedling // J. Crystal Growth. – 1988. – Vol. 89, Issue 4. – P. 435–446.
5. Mikki, F. T. A Neural Network Approach in a Backward Heat Conduction Problem [Text] : proc. of the IV Brazilian conf. / F. T. Mikki, E. I. Issamoto, J. da Luz, P. P. B. de Oliveira, H. F. Campos-Velho, J. D. S. da Silva // Neural Networks, 1999. – P. 19–24.
6. Левыкин, В. М. Информационная технология мониторинга температурных полей в процессе выращивания монокристаллов [Текст] / В. М. Левыкин, И. В. Шевченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – № 1 (46). – С. 133–138.
7. Zadeh, L. A. From Computing with Numbers to Computing with Words – From Manipulation of Measurements to Manipulation of Perceptions [Text] / L. A. Zadeh // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – 1999. – Vol. 45. – P. 105–119.
8. Takagi, T. Fuzzy identifications of systems and its application to modeling and control [Text] / T. Takagi, M. Cugeno // IEEE Trans. SMC-15. – 1985. – № 1. – P. 116–132.
9. Шевченко, И. В. Диагностика неблагоприятных ситуаций в процессе выращивания монокристаллов полупроводников [Текст] / И. В. Шевченко, Н. Н. Дымченко, С. А. Грицаков // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – 2014. – Вип. 1/2014 (84). – С. 34–43.
10. Шевченко, И. В. Информационная технология оптимизации геометрических параметров тепловых узлов установок для выращивания монокристаллов [Текст] / И. В. Шевченко // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 4 (81). – С. 114–120.