

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЗОННЫМ ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ ОТ ИСТОЧНИКА С ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТЬЮ

ЮМ. Зинин
г. Уфа, УГАТУ

Приведены результаты разработки алгоритма управления статическим источником электронагрева с ограниченной выходной мощностью. Проведенный анализ позволил оптимизировать нагрев нескольких зон в установке индукционного нагрева для эпитаксиальной технологии.

Эффективность использования электротермического оборудования и максимальной интенсификации процесса нагрева достигаем, решая задачу управления в следующей формулировке. Имеется несколько зон технологического нагрева, каждую из которых необходимо нагреть до определенной температуры. Исходная температура, подлежащих нагреву термических зон, одинакова и равна температуре окружающей среды. Тепловая мощность, выделяемая в каждой зоне равна P_i , суммарная тепловая мощность, выделяемая во всех зонах одновременно, ограничена мощностью источника питания [1].

Математическую модель нагреваемого тела, у которого перепад температур от поверхности к центру минимальный, так называемое «тонкое» тело, представляем в виде обыкновенных дифференциальных уравнений. Каждая из нагреваемых зон, в этом случае, имеет передаточную функцию апериодического звена и описывается линейными дифференциальными уравнениями [2].

Нагреваемые индукционным способом объекты представляем динамическими моделями, следующим образом:

$$\frac{d\tau}{dt} = -\alpha\tau + P, \quad \alpha = \frac{\lambda F}{Gc}, \quad \tau = \frac{P}{Gc}, \quad (1)$$

где τ , t , F , G , c , P - превышение температуры, время нагрева, площадь теплоизлучения, масса тела, его удельная теплоемкость и тепловая мощность источника энергии [3].

В уравнении (1) кроме составляющих пропорциональных увеличению теплосодержания $\frac{d\tau}{dt}$, конвекции $\alpha\tau$ и управляющей температурным режимом тепловой мощности P , отражается мощность взаимных тепловых потоков:

$$\begin{cases} \frac{d\tau_i}{dt} = -\alpha_i\tau_i + \sum_{j=1}^N q_{ji} + P_i, \\ q_{ji} = d_{ji}(\tau_j - \tau_i); \\ d_{ji} = d_{ij}, \quad i \neq j; \end{cases} \quad (2)$$

q_{ij} - взаимный тепловой поток зон нагрева.

После подстановки и преобразований получаем:

$$\frac{d\tau_i}{dt} = -(\alpha_i + \sum_{j=1}^N d_{ij})\tau_i + \sum_{j=1}^N d_{ji}\tau_j + P_i, \quad i \neq j, \quad (3)$$

где $\left(\alpha_i + \sum_{j=1}^N d_{ji}\right)\tau_i$ - теплоотдача соответствующей тепловой зоны, при $\tau_i = 0$;

$\sum_{j=1}^N d_{ji}\tau_j$ - тепловой поток, воспринимаемый соответствующей зоной, при $\tau_j = 0$.

Принимая $j = i$, одновременно полагая для первого члена $d_{ii} = \alpha_i$, получаем следующую систему дифференциальных уравнений в матричной форме:

$$\frac{d\tau}{dt} = B\tau + P, \quad \tau = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \dots \\ \tau_N \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & \dots & B_{1N} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & \dots & B_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{N1} & B_{N2} & B_{N3} & \dots & B_{NN} \end{pmatrix}; \quad P = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_N \end{pmatrix}.$$

Диагональные элементы матрицы B вычисляются по формуле

$$B_{ii} = -\sum_{j=1}^N d_{ji},$$

где остальные элементы $B_{ij} = d_{ij}$.

Полученная матрица симметрическая и с действительными коэффициентами. Такие матрицы обладают некоторыми особыми свойствами. Все собственные значения действительной симметрической матрицы B есть действительные числа. Всякую действительную симметрическую матрицу при помощи преобразования подобия $K = H B H^{-1}$ можно привести к диагональной матрице A с помощью неособенной матрицы H . Исходная B и диагональная матрица A имеют один и тот же характеристический полином и одинаковые собственные значения.

Если $d_{ij} = 0$, система приводится к виду с разделенными переменными:

$$\frac{d\tau}{dt} = A\tau + P, \quad A = \begin{pmatrix} -\alpha_{11} & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -\alpha_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -\alpha_{NN} \end{pmatrix}, \quad \alpha \geq 0.$$

Требуется определить вектор управления, чтобы нагреть тепловые зоны до необходимых температур за минимальное время.

Данная задача формализуется следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\tau}{dt} = B\tau + P, \quad T \rightarrow \min \\ \tau(0) = 0 \\ \tau(T) = \tau_k, \quad \sum_{i=1}^N P_i \leq Q \end{array} \right. \quad (4)$$

где $\tau = [\tau_i]$ - вектор, превышения температуры нагреваемой зоны над температурой окружающей среды.

Эта задача относится в теории управления к классу задач максимального быстродействия. Решение задачи производится аппроксимацией разностным аналогом непрерывной модели технологического процесса и последующим решением экстремальных задач на каждом из шагов дискретизации управления.

Для решения задач оптимизации, в реальном масштабе времени, применение указанного метода ограничено, так как он требует выполнения большого количества вычислительных процедур и сохранения числовых значений целевого функционала на каждом шаге решения [4].

Для решения (4) воспользуемся теоремой о конечном числе переключений.

Матрица B системы уравнений симметрическая с действительными элементами, она имеет N действительных корней. Следовательно, оптимальный вектор управления P^* , в соответствии с теоремой о конечном числе переключений, представляет кусочно-постоянную вектор-функцию. Он имеет не более $N-1$ переключений и на каждом интервале постоянства принимает определенное значение в одной из вершин многогранника U - управления.

Рассмотрим область управления U ,

$$\sum_{i=1}^N P_i \leq Q; \quad P_i \geq 0. \quad (5)$$

Эта область представляется выпуклым многогранником, ограниченным гиперповерхностями, построенными на попарно определенных осях координат.

Вершинами многогранника являются точки $P_\alpha = Q, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N.$

Графическое представление трехмерной гиперповерхности области управления показано на рис. 1.

$$A, g, U, P. \quad (6)$$

Область управления представляет собой выпуклый многогранник, ограниченный гиперповерхностью (6) и гиперповерхностями, построенными на попарных осях координат.

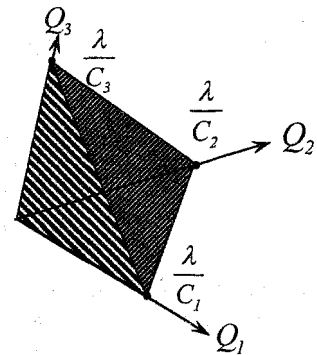


Рис. 1. График 3-мерной области управления многозонным нагревом

Вершинами многогранника являются точки

$$Q_j = \frac{\lambda}{C_j}, \quad (j = 1, 2, \dots, N).$$

Таким образом, вектор оптимального управления имеет N значений.

$$P_{[\beta]}^* = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ \dots \\ \beta \\ \dots \\ Q \\ 0 \end{array} \right\}, \quad \beta = 1, \dots, N. \quad (7)$$

Последнее выражение показывает, что для оптимального, по быстродействию, нагрева технологических зон необходимо, чтобы тепловая энергия выделялась поочередно в каждой из них. В этом случае задача синтеза оптимального регулятора приводится к определению очередности переключений и затем к определению моментов времени, когда эти переключения происходят.

Для этого введем новые координаты, определенные как

$$\tau = Ly. \quad (8)$$

Получаем $\frac{dy}{dt} = Ry + KP,$

$$\text{где } R = L^{-1}BL, \quad K = L^{-1}. \quad (9)$$

Далее используем свойство симметрических матриц. Представим матрицу L , чтобы матрица R системы (9) была диагональной. Следовательно, мы определим координаты, в которых исходная система описывается уравнением с диагональной матрицей, а траектории и управление в этих координатах определены линейными преобразованиями.

Синтез оптимального регулятора в рассматриваемой линейной системе, описываемой уравнением с симметрической матрицей, приводится к поиску оптимальных P^* управлений в системе с диагональной матрицей. В процессе решения мы

используем аффинное преобразование траектории τ температур и управления P .

Рассмотрим диагональную матрицу A .

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\tau}{dt} &= A\tau + P, \quad T \rightarrow \min \\ \tau(0) &= 0 \\ \tau(T) &= \tau_k, \quad \sum_{i=1}^N P_i \leq Q_{CC}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Для каждого из интервалов вектора управления полученную систему (9) представим в виде

$$\frac{d\tau_\beta}{dt} = A\tau_\beta + P, \quad \tau_\beta = \tau + A^{-1}P. \quad (11)$$

Решение последнего уравнения получаем в следующем виде

$$\tau_\beta = \tau_{\beta 0} e^{At}, \quad (12)$$

где e^{At} – матричный экспоненциал;

$\tau_{\beta 0}$ – начальное значение вектора температур.

Учитывая выражения (10) и (11), а также диагональную структуру матрицы A и граничные значения получаем краевую задачу многозонного нагрева в следующем виде

$$\left. \begin{aligned} v_N (1 - e^{-\alpha_N t_N}) &= \sigma_N \\ v_{N-1} (1 - e^{-\alpha_{N-1} t_{N-1}}) e^{-\alpha_{N-1} t_N} &= \sigma_{N-1} \\ v_{N-2} (1 - e^{-\alpha_{N-2} t_{N-2}}) e^{-\alpha_{N-2} (t_N + t_{N-1})} &= \sigma_{N-2} \\ \dots & \\ v_1 (1 - e^{-\alpha_1 t_1}) e^{-\alpha_1 (t_N + t_{N-1} + \dots + t_2)} &= \sigma_1 \\ \sum_{i=1}^N t_i &= T \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

где $v_i = \frac{Q_{CC,i}}{\alpha_i}$, t_i – длительность соответствующего интервала вектора управления.

Система (13) при фиксированной очередности переключений определяет полную длительность нагрева.

Мы определили задачу оптимизации как составление очередности в нумерации индексов с целью минимизации значения T - периода управления.

Определим оптимальное управление в виде дискретной функции индексного аргумента

$$\frac{\max e^{-T}}{i} = \max \left(\left(\left(\dots \left(\left(1 - \frac{\sigma_N}{v_N} \right)^{\alpha_N} - \frac{\sigma_{N-1}}{v_{N-1}} \right)^{\alpha_{N-1}} - \frac{\sigma_{N-2}}{v_{N-2}} \right)^{\alpha_{N-2}} - \dots - \frac{\sigma_2}{v_2} \right)^{\alpha_2} - \frac{\sigma_1}{v_1} \right)^{\alpha_1} \right) \quad (14)$$

Представим вектор P в следующем виде:

$$P = Q g U, \quad (15)$$

где $U = [U_i]$ – нормированный вектор управления;

$g = [g_{ii}]$ – диагональная весовая матрица.

После указанных преобразований представим последнее равенство в следующем виде:

$$\frac{d\tau}{dt} = B\tau + PgU. \quad (16)$$

Последнее выражение позволяет определить передаточную матрицу по управлению

$$W(p) = P(pE - B)^{-1} g = W_1(p)W_2(p),$$

где $W_1(p) = P$ и $W_2(p)$ – передаточные функции звеньев разомкнутой системы регулирования.

Оптимальное управление определено в следующем виде:

$$\|pU\| = \left| P \sum_{i=1}^N U_i \right| \leq P.$$

Алгоритм управления многозонным регулятором заключается в том, чтобы переходной процесс системы от начальных значений до конечной температуры протекал за минимальное время.

Введем новые фазовые переменные $y = [y_i]$, связанные со старыми переменными квадратной матрицей L : $\tau = Ly$.

Описание электротермического процесса в данной системе координат получаем из (16).

После преобразований это выражение будет иметь вид:

$$\left[\frac{dy}{dt} = Ry + Pg_1 U, \quad R = L^{-1}BL, \quad g_1 = L^{-1}g \right].$$

Изменением матрицы L можно отобразить исходный процесс в новую систему координат, где оптимальные траектории $\tau(t)$ отображаются в оптимальные траектории $y(t)$, при этом начальные и конечные точки этих траекторий однозначно соответствуют друг другу.

При этом отображении рассматриваемого процесса в системах неизменными остаются временные параметры, так как преобразованию подлежат только пространственные координаты, а не временные характеристики процесса.

Временные координаты, характеризующие быстродействие системы и длительности настроенных интервалов времени управления на каждую из зон, равны.

В результате преобразований система уравнений оптимального управления многозонным нагревом принимает следующий вид:

$$\left\| \begin{aligned} \frac{d\tau}{dt} &= A\tau + PgU, \quad T \rightarrow \min \\ \tau(0) &= 0, \quad \tau(T) = \sigma, \quad \sum_{i=1}^N U_i \leq 1 \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

где A, g, U, P – диагональная матрица, весовая диагональная матрица, нормированный вектор управления и ресурс (мощность) источника питания.

В системе уравнений (16) интервалы времени t_i определяются условием перехода вектора управления U из начальных координат, для которых $\tau(0) = 0$ к концам фазовой траектории $\tau(T) = \sigma$. Этому условию удовлетворяет множество $N!$ нормированных векторов управления U . Оптимальным вектором, согласно теории расписаний, является вектор, который обеспечивает минимальное время T_{\min} .

Нам необходимо установить оптимальную последовательность нумерации идентификационных индексов.

Задача упорядочения индексов в постановке теории расписания:

$$f(\pi^*) = \max \left(\left(\dots \left(\left(\left(1 - \frac{\sigma_N}{V_N} \right)^{\frac{\alpha_{N-1}}{\alpha_N}} - \frac{\sigma_{N-1}}{V_{N-1}} \right)^{\frac{\alpha_{N-2}}{\alpha_{N-1}}} - \dots - \frac{\sigma_{N-2}}{V_{N-2}} \right)^{\frac{\alpha_{N-3}}{\alpha_{N-2}}} - \frac{\sigma_{N-3}}{V_{N-3}} \right)^{\frac{\alpha_{N-4}}{\alpha_{N-3}}} - \dots - \frac{\sigma_2}{V_2} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}} - \frac{\sigma_1}{V_1} \right)^{\frac{1}{\alpha_1}} \quad (18)$$

где π^* – оптимальная последовательность переключений, определяющая минимальное значение T_{\min} .

Реализация управления системой нагрева определяется выявлением последовательности переключений зон нагрева π^* с последующим вычислением периода вектора управления π^* . Затем система переходит в следующую позицию, соответствующую очередному переключению вектора управления.

Алгоритм, оптимальной по быстродействию, системы многозонного нагрева следующий.

1. Определение оптимальной последовательности вектора управления π^* . Эта операция производится программным обеспечением супервизорной ЭВМ, входящей в состав системы управления.

2. Вычисление температуры нагреваемых зон в моменты переключений системы γ_i . Производится аппроксимацией градуировочной характеристики измерительной термопары.

3. При достижении любой зоной нагрева заданного значения температуры происходит переключение системы в следующую позицию.

Для реализации алгоритма необходимо, чтобы источник энергии, переключаемый на индукционные нагрузки, обладал меньшим запаздыванием, чем тепловая постоянная времени нагреваемых зон.

При управлении системой многозонного нагрева нами использована ЭВМ, что потребовало разработки интерфейса, обеспечивающего подключение локальных контуров частотного регулирования [6, 7].

Управление системой осуществляется по супервизорному принципу, вектор управления многозонной системой индукционного нагрева интерпретируется адресом (номером) канала, на кото-

рый происходит переключение управления частотой, а значение этой частоты определяется в первом цикле подключенной нагрузки инструментальными средствами.

Приведенный алгоритм системы управления инверторно-индукционной установкой позволил эффективно использовать индукционный нагрев в прецизионной технологии эпитаксиального производства изделий микроэлектроники.

На рис. 2 показана установка, в которой реализуется нагрев герметизированной рабочей зоны с высокоточными испарителями кремнийсодержащего реагента от тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ).

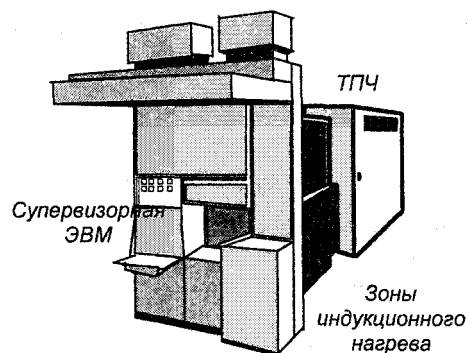


Рис. 2. Многозонная тиристорно-индукционная установка для эпитаксиального производства

Технологический процесс управляется микропроцессорной системой, обеспечивающей программируемое управление температурой, регулируемый расход технологических газов и управление временем технологических операций [7].

Установка предназначена для наращивания эпитаксиальных слоев кремния на пластинах диаметром 150, 100 и 76 мм. Она оснащена кварцевым реактором цилиндрического типа с индукционно-радиационным нагревом пластин (с системой преотражения излучаемой энергии) и системой контроля герметизации реактора.

Диапазон рабочих температур 900... 1250 °С, неравномерность температурного поля в нагреваемой зоне не более 10 °С, скорость нагрева и охлаждения кремниевых пластин в рабочем диапазоне температур 20... 100 °С/мин.

Супервизорная ЭВМ обеспечивает стабилизацию и допусковый контроль параметров процесса с выводом информации на дисплей.

Процесс управления направлен на выравнивание средних относительных температур нагреваемых зон. Если от периода к периоду меняется номер «лидирующей» зоны, то отстающие получают энергию и соответствующее приращение температуры, пропорциональные степени отставания в предыдущем периоде. Таким образом, выявленный алгоритм оптимального управления в функции разности установленных и текущих значений температур нагреваемого объекта обеспечивает процесс регулирования многозонным индукционным нагревом.

Литература

1. А.с. № 1102057. Способ управления индукционной нагревательной установкой. Марон В.М., Иванов А.В., Зинин Ю.М., Ройзман П.С. Оpubл. в БИ№25, 1984 г.

2. Шапиро С.В., Зинин Ю.М., Иванов А.В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 168 с.

3. Синтез оптимального по быстродействию регулятора системы с ограниченными ресурсами/ Ю.М. Зинин, В.М. Марон, П.С. Ройзман, В.А. Пацкевич// Межвуз. науч. сб. «Электронные системы управления и контроля летательных аппаратов». — Уфа, 1984. - Вып. 9.

4. Зинин Ю.М. Информационно-вычислительный комплекс электротермической установки// Межвуз. науч. сб. «Измерительные преобразова-

тели и информационные технологии». - Уфа: УГАТУ, 1998.-С. 195-202.

5. Зинин Ю.М. Ройзман Ю.Л. Современные тиристорные преобразователи повышенной частоты «Петра». Аэрокосмическая техника и высокие технологии. Всероссийская научно-техническая конференция. -Пермь: ПГТУ, 2002.

6. Зинин Ю.М. Автоматизированные инверторно-индукционные комплексы электротермической обработки// Межвуз. науч. сб. «Электромеханические комплексы и системы управления ими». - Уфа: УГАТУ, 1998. - С. 102-105.

7. Зинин Ю.М. Синергия управления инверторно-индукционными системами электротермических установок повышенной частоты// Межвуз. науч. сб. «Управление в сложных системах». — Уфа.-1998.-С. 171-176.

Зинин Юрий Михайлович, доцент кафедры ЭЛА и НТ УГАТУ. В 1969 г. окончил УАИ, с 1978 г. - канд. техн. наук. Научные интересы связаны с исследованиями в области систем управления и проектирования высокочастотных установок индукционного нагрева от полупроводниковых преобразователей частоты.