

Оптимальное управление подвижным источником теплового воздействия при легировании заготовок кварцевых оптических волокон

В. П. Первадчук¹, Д. Б. Владимирова²,
А. Н. Кокоулин³

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет
^{1,2}pervadchuk@mail.ru, ³a.n.kokoulin@at.pstu.ru

А. А. Пестерев

ПАО Пермская научно-производственная
приборостроительная компания
a.a.pesterev@gmail.com

Аннотация. В настоящей работе рассматривается задача оптимального управления подвижным источником теплового воздействия в процессе легирования методом MCVD (*modified chemical vapor deposition*). Задача оптимального управления ставится на базе математической модели нагрева кварцевой трубы подвижным тепловым источником. Цель управления – стабилизация температурного поля на поверхности нагреваемой кварцевой трубы, в соответствии с заданным критерием оптимальности.

Ключевые слова: оптимальное управление; распределенные системы; подвижный тепловой источник; процесс MCVD

I. ВВЕДЕНИЕ

Анализ температурных процессов, протекающих в зоне разогрева, и синтез системы автоматического регулирования, построенной на сравнении заданного и измеряемого температурных полей, является перспективным направлением развития технологии MCVD. Проектирование такой системы ставит дополнительные требования к наблюдаемости объекта управления, требует учета распределенных свойства объекта управления. Переход к рассмотрению процесса управления температурным полем на поверхности трубы в процессе MCVD как системы с распределёнными параметрами фокусирует внимание на классе относительно новых систем управления – систем управления с подвижным источником воздействия. Подвижное воздействие является, по существу, основным способом управления систем с распределёнными параметрами. Принципиальная схема процесса легирования методом MCVD представлена на рис. 1.

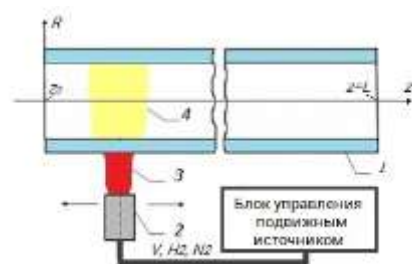


Рис. 1. Схематическое изображение процесса MCVD: 1 – кварцевая труба; 2 – движущаяся горелка (стрелки показывают направление движения); 3 – пламя горелки; 4 – зона реакции

II. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работах [10, 11] рассмотрена математическая модель нагрева кварцевой трубы подвижным источником воздействия, представленная уравнением теплопроводности следующего вида

$$\frac{\partial T(t, z)}{\partial t} - a \frac{\partial^2 T(t, z)}{\partial z^2} + \alpha T(t, z) + \beta T^4(t, z) = F(u, t, z) \quad (1)$$

где t – время; z – координата; u – управление; T – температура кварца; a – коэффициент теплопроводности; α и β – некоторые коэффициенты.

Правая часть уравнения (1) зависит от теплового потока. Энергия теплового потока расходуется на нагрев кварцевой трубы, теплообмен с парогазовой смесью, поступающей внутрь трубы, а также на излучение и теплообмен с окружающей средой. В данной постановке функция F имеет вид:

$$F(u, t, z) = \frac{S_R}{\rho c V} q(z, t) + \frac{S_R \alpha_c}{\rho c V} T_c + \frac{S_R \alpha_c \beta}{\rho c V} T_c^4 + \frac{S_0 \alpha_z}{\rho c V} T_z$$

где ρ , c , λ – плотность удельная теплоемкость и теплопроводность кварца соответственно; a_r и a_c – коэффициенты теплообмена с газом и внешней средой; S_R и S_0 – площади внешней и внутренней цилиндрических

поверхностей, V – объем полого цилиндра, T_c и T_c – температура газа и внешней среды.

Дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка с нелинейным оператором вида (1) решается при задании начальных и граничных условий [10].

Предположим, что известно программное движение (состояние), т.е. известны функции $\Delta T(t, z)$ и $\Delta u(t, z)$. Однако реальное (истинное) состояние системы всегда будет отличаться от программного. Поэтому можно записать, что

$$T(t, z) = T^*(t, z) + \Delta T(t, z)$$

$$u(t, z) = u^*(t, z) + \Delta u(t, z)$$

где $T(t, z)$ и $u(t, z)$ – реальное состояние системы; $\Delta T(t, z)$ и $\Delta u(t, z)$ – возмущения (отклонение реального состояния от программного).

В работе [11] из (1) получено линеаризованное уравнение теплопроводности для возмущений $\Delta T(t, z)$, которое имеет вид:

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} - a \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial \Delta T}{\partial z} + \beta \Delta T = \gamma \Delta u$$

Подвижный источник нагрева – тепловой поток $q(z, t)$ от газовой горелки опишем функцией Гаусса, имеющей вид [10]

$$q(t, z) = q_{\max} \cdot e^{-\left(\frac{z - \int_0^t v(\xi) d\xi}{H}\right)^2}$$

где $v(\xi)$ – скорость движения горелки, H – дисперсия (ширина формы теплового источника), q_{\max} – мощность горелки.

Исследование математической модели подвижного источника представлено в работе [12].

Целью оптимального стабилизирующего управления является подбор таких параметров горелки как ее мощность, форма пламени и скорость движения, при которых

$$|\Delta T(t, z)| \rightarrow 0$$

В данной работе в качестве функции управления $\Delta u(t, z)$ определим мощность горелки q_{\max} , а целевой функционал для задачи оптимального управления представим в следующем виде [10]

$$F(u, \Delta T) = \int_0^{\tau} \int_0^L \Delta T^2 dz dt + \sigma \int_0^{\tau} \int_0^L \Delta u^2 dz dt$$

где τ – время управления, L – длина кварцевой трубы, σ – некоторый параметр, характеризующий цену управления.

Тогда согласно работе [11] система оптимальности, состоящая из дифференциальных уравнений для функций $\Delta T(t, z)$ и сопряженной с ней вспомогательной функции $p(t, z)$, будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} - a \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial \Delta T}{\partial z} + \beta \Delta T = -\frac{\gamma^2 p}{\sigma}, \\ \frac{\partial p}{\partial t} + a \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial p}{\partial z} - \beta p = -\Delta T, \\ \Delta T|_{t=0} = T_0(z), p|_{t=\tau} = 0, \\ \Delta T|_{z=0} = T_1(z), p|_{z=0} = 0, \\ \frac{\partial \Delta T}{\partial z}|_{z=L} = T_2(z), \frac{\partial p}{\partial z}|_{z=L} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Вспомогательная функция $p(t, z)$ и функция управления $\Delta u(t, z)$ связаны соотношением следующего вида:

$$\Delta u(t, z) = -\frac{\gamma^2 p(t, z)}{\sigma}$$

Важно отметить ключевую особенность данной постановки задачи оптимального управления – возможность получить приближенное решение системы (2) в аналитическом виде, что пригодно для использования в режиме реального времени систем автоматического управления.

Следует отдельно отметить, что управление скоростью движения горелки и расходом азота на обдув горелки в проектируемой системе управления осуществляется по программному закону.

III. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО РЕГУЛЯТОРА

Поясним принцип действия проектируемой системы управления, представленной на рис. 2.

Предположим, что длительность процесса MCVD равна T_n . Под процессом в данном случае будем иметь ввиду проход горелки в направлении подачи парогазовой смеси от $z=0$ до $z=L$. Тогда для любого t из $[0, T_n]$ нам известно распределение температуры $T^*(t, z)$ и соответствующее управление $u^*(t, z)$. Пусть контроль фактической температуры осуществляется с помощью сканирующего пирометра через равные промежутки времени, равные τ . Тогда решение задачи оптимального стабилизирующего управления тепловым источником будет происходить на временном промежутке $[0, \tau]$. Причем, при $tL=0$ ($tL \in [0, \tau]$), нам известны значения

$$\Delta T(0, z) = T(0, z) - T^*(0, z)$$

где $T(0, z) = T(t, z)$ – это фактическая температура, полученная с помощью сканирующего пирометра в момент времени t . Принимая $\Delta T(0, z)$ за начальное условие, а граничные условия для $\Delta T(t, z)$ равным нулю вычислим

температуру $\Delta T^*(t, z)$ и изменение во времени теплового потока (управления) $\Delta u^*(t, z)$. Это управление будет действовать только на временном промежутке $[0, \tau]$, по истечении которого происходит новый замер температуры, вычисляем $\Delta T(0, z)$ и т.д.

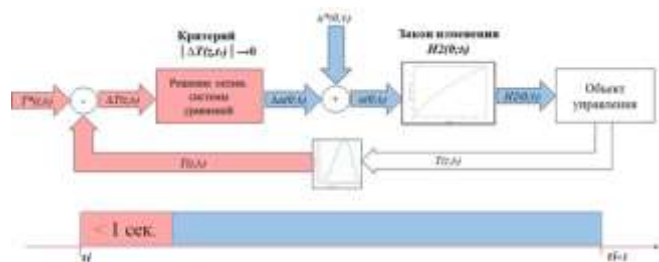


Рис. 2. Принцип действия системы управления

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена задача оптимального управления подвижным источником теплового воздействия в процессе MCVD. Предложенный способ управления основан на математической модели нагрева кварцевой трубы подвижным источником воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Бурков, В.Д., Иванов, Г.А. Физико-технологические основы волоконно-оптической техники. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. 222с.
 [2] M. Choi, K.S. Park, J. Cho, Modelling of chemical vapour deposition for optical fibre manufacture // Opt. Quant. Electron. 27 (5) (1995) 327-335.

[3] K.B. McAfee, K.L. Walker, R.A. Laudise, R.S. Hozack, Dependence of equilibria in the modified chemical vapor-deposition process on SiCl_4 , GeCl_4 , and O_2 // J. Am. Ceram. Soc. 67 (6) (1984) 420-424.
 [4] Suzanne R. Nagel, J. B. Macchesney, And Kenneth L. Walker. An Overview of the Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) Process and Performance // IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. QE-18, NO. 4, APRIL 1982.
 [5] L. Cognolato. Chemical Vapour Deposition for Optical Fibre Technology // JOURNAL DE PHYSIQUE IV Colloque C5, supplment au Journal de Physique 11, Volume 5, juin 1995.
 [6] D. L. Wood, K. L. Walker, J. B. Macchesney, Member, J. R. Simpson, And R. Csencsits. Germanium Chemistry in the MCVD Process for Optical Fiber Fabrication // JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. LT-5, NO. 2, FEBRUARY 1987.
 [7] Бутковский А.Г., Пустыльников Л.М. Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами. М.: «Наука», 1980.
 [8] Фурсиков А.В. Оптимальное управление распределенными системами. Теория и приложения: Учебное пособие. Новосибирск: Научная книга, 1999. 352 с. (Университетская серия).
 [9] Егоров А.И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами. М.: Наука, 1978, 464 с.
 [10] Первадчук В.П., Шумкова Д.Б. Оптимальное управление в задачах с подвижным тепловым источником // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2010. Т. 2. № 98. С. 37-44.
 [11] В.П. Первадчук, Д.Б. Владимирова, Д.Н. Дектярев. Оптимальное стабилизирующее управление подвижным тепловым источником в процессе MCVD // Прикладная фотоника. Т. 3, № 1, 2016.
 [12] В.П. Первадчук, Д.Б. Владимирова, Д.Н. Дектярев, А.А. Пестерев. Моделирование нагрева кварцевых труб подвижным источником воздействия для решения задачи управления процессом MCVD // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 9-2 (51). С. 76-82.