

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Математическое моделирование температурно-временных зависимостей и распределение тепловых полей на поверхности кремневой пластины при нагреве лазерным источником.

Целью математического моделирования является получение зависимостей распределения тепла на поверхности кремневой пластины подверженной лазерному нагреву. Моделирование включает в себя следующие этапы: задания параметров модели кремневой пластины и параметров лазерного источника, задание свойств анализа и проведение расчета, просмотр и анализ результатов. Физику и термодинамику лазерного нагрева можно описать следующими математическими зависимостями, приведенными ниже.

Температура поверхности зависит от мощности, поглощенной единицей площади. Тогда энергия поглощенного излучения [2]:

$$E = P \cdot \tau = q \cdot S \cdot \tau(1)$$

где q – плотность мощности; P – мощность введенная через поверхность; S – площадь облучаемой поверхности; τ – длительность воздействия.

Соотношение между распределением температуры по поверхности $T(x,y,z)$ в зависимости от времени воздействия и плотностью мощности q может быть определено из уравнений теплопроводности типа [2]:

$$\frac{\delta T(x, y, z, t)}{\delta t} - \alpha \cdot \Delta T(x, y, z, t) = \frac{Q(x, y, z, t)}{\rho \cdot c} \quad (2)$$

где Δ – оператор Лапласа, Q – объемная плотность поглощенного светового потока, α – температуропроводность ($\alpha = k/\rho c$, где k – теплопроводность, ρ – плотность, c – теплоемкость), x, y, z, t – аргументы функции.

Объемная плотность поглощенного светового потока с учетом поглощательной способности и направлением по оси z [2]:

$$Q(x, y, z, t) = q_0 \cdot A \cdot e^{-\alpha z} \quad (3)$$

где q_0 – плотность мощности падающего излучения, α – поглощательная способность на волне излучения; α – линейный коэффициент поглощения на волне излучения, m^{-1} ; z – координата отсчитываемая от поверхности в глубину материала.

Особенностью задач, связанных с нагревом материалов лазерным излучением является то, что распределение излучения и, следовательно, тепловой источник, как правило, обладает резко изменяющимися пространственно-временными характеристиками. Поэтому идеализация свойств тепловых источников, часто допускаемая в расчетных схемах для уменьшения

математических трудностей, может приводить к отклонениям расчетных данных от экспериментальных. [2] Таким образом, функция гауссового импульса позволяет описать профиль излучения лазерного источника и задать нормальное распределение плотности мощности падающего лазерного излучения. Распределение тепла по поверхности будем считать равным во всех направлениях от точки (x_0, y_0) нормального падения луча:

$$Q(x, y, z, t) = q_0 \cdot A \cdot e^{-\alpha z} \cdot \frac{\alpha}{\pi r^2} \cdot e^{-\left(\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2r^2}\right)} \quad (4)$$

где $Q(x, y, z, t)$ – функция, характеризующая распределение плотности поглощения светового потока на поверхности материала и изменение его во времени, z – ось перпендикулярная поверхности и отсчитываемая от поверхности вглубь материала, r – радиус пятна излучения.

Теплообменом облучаемой поверхности с окружающей средой можно пренебречь. Задаем действие источника на поверхности ($z = 0$) граничным условием [3]:

$$-k \cdot \frac{\delta T(x, y, z, t)}{\delta z} |_{(z=0)} = Q(x, y, t)$$

Если размеры нагреваемого тела достаточно велики ($l_x, l_y, l_z \gg \sqrt{\alpha \tau}$), то его можно считать полубесконечной средой:

$$T_{x \pm \infty} = T_{y \pm \infty} = T_z = T_H, \quad (5)$$

где T – начальная температура ($T_{t=0} = T_H = 293, 15$).

Теплообменом облучаемой поверхности с окружающей средой можно пренебречь.

Решив уравнение теплопроводности, получаем распределение температуры по поверхности при использовании источника с гауссовым профилем [2]:

$$T(x, y, z, t) = \frac{2p}{\rho c (4\pi\alpha)^{3/2}} \int_0^t \frac{1}{(\tau+t)\sqrt{t}} \cdot e^{-\frac{z^2}{4\alpha t} - \frac{x^2+y^2}{4\alpha(\tau+t)}} dt \quad (5)$$

где p – мощность излучения, введенная в материал через площадку s ; $\tau = \alpha/4r$; r – радиус пятна излучения; a – коэффициент теплопроводности; ρ – удельная теплоемкость; ρ – плотность материала; t – текущее время.

В качестве источников лазерного нагрева выбраны: Lotis ТП LS-2132UTF с длиной волны

1064 мкм (1) и с длиной волны 532 мкм (2) Полные характеристики лазера приведены в таблице 1.

Моделирование распределения температуры по поверхности кремневой пластины и зависимостей скорости роста температур, выполнено в программном пакете Comsol Multiphysics 5.3a. Для расчета были заданы одинаковые для двух типов нагревателей исходные и граничные условия, и характеристики лазеров для каждого в отдельности. Окружающая среда – воздух в нормальных условиях.

В качестве модели использовалась кремневая пластина с параметрами, приведенными в таблице 2.

Таблица 1 – Основные характеристики лазерного источника

	1	2
Длина волны, мкм	1064	532
Энергия, мДж	170	110
Длительность импульса ($\tau_{0.5}$), нс	5 – 6	4 – 5
Частота повторения импульса, Герц	15	15
Диаметр выходного пучка, мм	≤ 5	≤ 5
Мощность, Вт	750	750

Таблица 2 – Параметры модели кремниевой пластины

Диаметр пластины, мм	25,4	Плотность, кг/м ³	2329
Толщина пластины, мкм	200	Теплоемкость, Дж/(кг*К)	700
Излучательная способность поверхности пластины	0,8	Температура кипения и испарения	2349, 85°С(2623К)

В результате моделирования получены температурно-временные зависимости (рисунок 1.А) и тепловые поля на поверхности кремневой пластины (рисунок 2.Б). По температурно-

временным зависимостям видно, что для получения температуры испарения кремня, лазеру с параметрами А потребовалось в два раза меньше времени а значит и энергии.

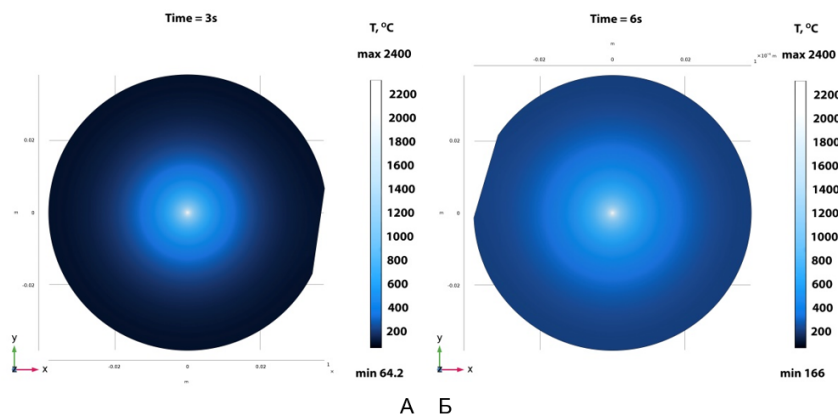


Рис. 1 – Распределение тепловых полей на поверхности кремневой пластины (А – Лазер с параметрами 1, Б – Лазер с параметрами 2)

По результатом распределение тепловых полей на поверхности кремневой пластины, видно, что для получения искомой температуры испарения кремня необходимой для формирования переходного отверстия, составляющей 2400° для лазера с параметрами 1 потребовалось в два раза больше времени. Так же выявлено что с ростом продолжительности процесса растет температура всей пластины, что может негативно сказаться на качестве формируемых отверстий из-за формирования напылов на большей площади от точки воздействия.

1. COMSOL Multiphysics ПО для мультифизического моделирования [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/>
2. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть II. Лазерный нагрев и разрушение материалов. Учебное пособие. Под общей редакцией В.П. Вейко – СПб: НИУ ИТМО, 2014. –181с.
3. Вейко В.П., Шахно Е.А. Сборник задач по лазерным технологиям. Изд. 3–е, испр. и дополн. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 67 с.