

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК 3D ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Лаппо А. И., Боброва Т. С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ланин В. Л. – д.т.н., профессор

Компьютерное моделирование температурно-временных зависимостей и распределение тепловых полей на поверхности кремниевых подложек в пакете Comsol Multiphysics при воздействии лазерным нагревом.

Целью моделирования в пакете *Comsol Multiphysics* [1] является получение распределения тепла на поверхности кремниевых подложек подверженных лазерному нагреву.

Использование лазерной энергии для обработки материалов основано на поглощении лазерного излучения веществом. При взаимодействии с поверхностью материала излучения частично отражается, а частично проникает внутрь материала, поглощается в нем и, как правило, достаточно быстро переходит в тепло

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

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

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]:

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

где Δ – оператор Лапласа, Q – объемная плотность поглощенного светового потока, a – температуропроводность ($a=k/\rho c$, 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 – теплопроводность, A – поглощательная способность на волне излучения; α – линейный коэффициент поглощения на волне излучения, m^{-1} ; z – координата отсчитываемая от поверхности в глубь материала.

Задав начальные, граничные условия и решив уравнение теплопроводности получаем распределение температуры по поверхности при гауссовом распределении тепла [2]:

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

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

В качестве источников лазерного нагрева выбраны: Lotis TII LS-2132UTF с длиной волны 1064 мкм (1) и с длиной волны 532мкм (2) Полные характеристики лазера приведены в таблице. 1.

Таблица 1. Основные характеристики лазерного источника

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

Моделирование распределения температуры по поверхности кремниевых подложек и зависимостей скорости роста температур, выполнено в программном пакете *Comsol Multiphysics*

5.3а. 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 кремниевая подложка с параметрами, приведенными в таблице 2.

Таблица 2. Параметры модели кремниевой подложки

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

В результате моделирования получены температурно-временные зависимости (рисунок 1) и тепловые поля на поверхности кремниевых подложек (рисунок 2). 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.

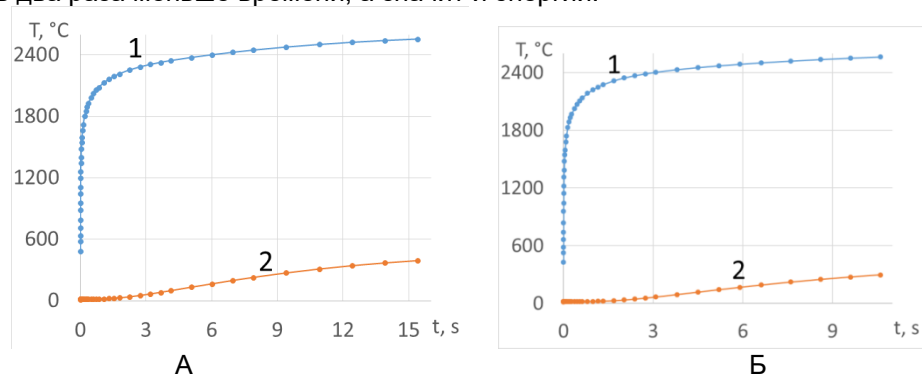
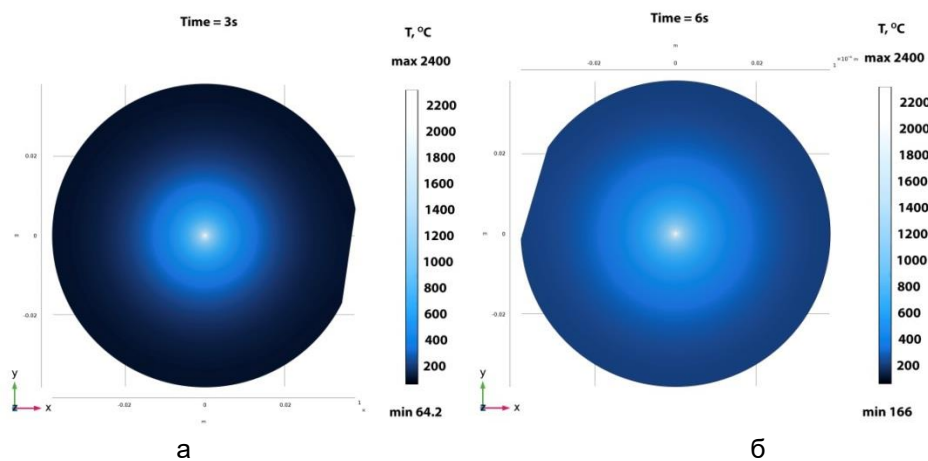


Рисунок 1 – Температурно-временные зависимости на поверхности кремниевых подложек, 1 – максимальная температура в точке воздействия, 2 – минимальная температура кремневой пластины

(А – Лазер с параметрами 1, Б – Лазер с параметрами 2)



а – Лазер с параметрами 1, б – Лазер с параметрами 2

Рисунок 2 – Распределение тепловых полей на поверхности кремниевых подложек

По результатам распределение тепловых полей на поверхности кремниевых подложек, видно, что для получения искомой температуры испарения кремня необходимой для формирования переходного отверстия, составляющей 2400°C 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 наплывов на большей площади от точки воздействия.

Список использованных источников:

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.