

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

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

### ВВЕДЕНИЕ

3D электронные модули, которые способны интегрировать множество микросхем на основе различных технологий в один единый корпус, позволяют создать устройств малых размеров, широким набором функций и доступных по стоимости. Одно из современных направлений реализации 3D-модулей является технология TSV (Through Silicon Vias – сквозные отверстия в кремнии). Лазерная обработка – один из методов формирования переходных отверстий.

Целью математического моделирования является получение зависимостей распределения тепла на поверхности кремневой пластины подверженной лазерному нагреву. Моделирование включает в себя следующие этапы: задания параметров модели кремниевой пластины и параметров лазерного источника, задание свойств анализа и проведение расчета, просмотр и анализ результатов.

### 1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА

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;  $\tau$  – 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  $\Delta$  – оператор Лапласа,  $Q$  – объемная плотность поглощенного светового потока,  $\alpha$  – температуропроводность ( $\alpha = k/\rho c$ , где  $k$  – теплопроводность,  $\rho$  – 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,  $A$  – поглощательная способность на волне

излучения;  $\alpha$  – линейный коэффициент поглощения на волне излучения,  $m^{-1}$ ;  $z$  – координата отсчитываемая от поверхности в глубь 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 [4]:

$$-k \cdot \frac{\delta T(x, y, z, t)}{\delta z} |_{(z=0)} = Q(x, y, t) \quad (5)$$

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

$$T_{x \pm \infty} = T_{y \pm \infty} = T_z = T_H, \quad (6)$$

где  $T_H$  – 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 [3]:

$$T(x, y, z, t) = \frac{2p}{\rho c (4\pi\alpha)^{3/2}} \int_0^t \frac{1}{(\tau + t)\sqrt{t}} \quad (7)$$

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

## II. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ COMSOL MULTIPHYSICS 5.3a

В результате моделирования получены температурно-временные зависимости (рис 1) и тепловые поля на поверхности кремневой пластины (рис 2). По температурно-временным зависимостям видно, что профиль температуры имеет мгновенный рост до температуры 2000 после чего, в течении 3 секунд температура достигает своего пика. При продолжении процесса происходит нагрев всего объема кремневой пластины.

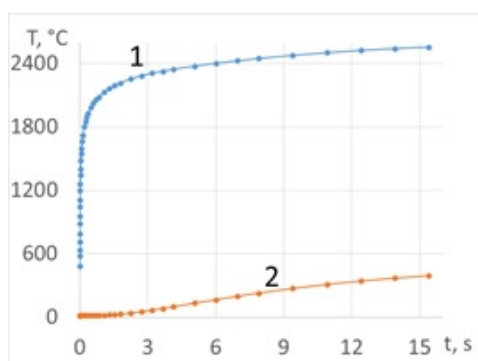


Рис. 1 – Температурно-временные зависимости на поверхности кремневых подложек, 1 – максимальная температура в точке воздействия, 2 – минимальная температура кремневой пластины

В качестве источника лазерного нагрева выбран: Lotis ТП LS-2132UTF с длиной волны 1064мкм, энергия импульса 170мДж, длительность импульса 5-6нс, частота импульса 15Гц, диаметр выходного пучка 5мм, мощность - 750Вт.

Моделирование распределения температуры по поверхности кремневой пластины и зависимостей скорости роста температур, выполнено в программном пакете Comsol Multiphysics 5.3a. Для расчета были заданы исходные и граничные условия, и характеристики лазерного источника. Окружающая среда – воздух в нормальных условиях.

*Лаппо Александр Игоревич*, аспирант кафедры электронной техники и технологии БГУИР, lappo@bsuir.by

*Ярмолик Валерий Иванович*, ассистент кафедры информационных технологий автоматизированных систем БГУИР, v.jarmolik@bsuir.by

*Наврость Маргарита Сергеевна*, студент 4 курса, факультет ФИТУ

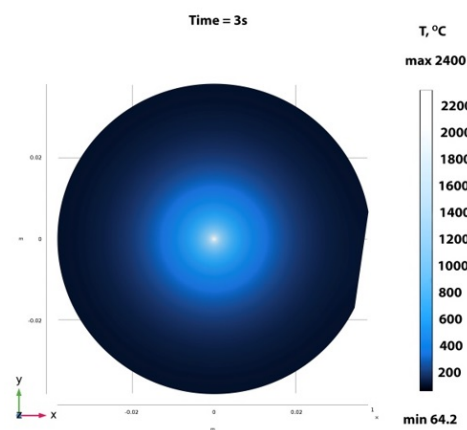


Рис. 2 – Распределение тепловых полей на поверхности кремневой пластины

В качестве модели использовалась кремневая пластина с диаметром 25.4мм, толщина - 200мкм, влучательная способность поверхности пластины - 0.8, плотность - 2329кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость - 700Дж/(кг\*К), температура кипения и испарения - 2623К.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам распределение тепловых полей на поверхности кремневой пластины, видно, что для получения искомой температуры испарения кремния необходимой для формирования переходного отверстия, составляющей 2400°С для лазера потребовалось 3 секунды. 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.

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.