

УДК 621.373.826

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК



В.Л. Ланин

Профессор кафедры электронной техники и технологии, доктор технических наук



Н.Д. Чан

Магистрант кафедры электронной техники и технологии, гражданин Вьетнама

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь
E-mail: vlanin@bsuir.by, nhandatran94@gmail.com*

В.Л. Ланин

Профессор, доктор технических наук, куратор специальности 39.02.02 Проектирование и производство программно-управляемых электронных средств.

Н.Д. Чан

Родился 30 сентября 1994 года в провинции Куанг Чи, Вьетнам. В 2012 году поступил в Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куи Дона. В 2018 окончил БГУИР по первой ступени. С 2018 года обучается в магистратуре БГУИР.

Аннотация. Моделирование в программных пакетах COMSOL Multiphysics и MathCAD термопрофилей лазерной обработки и глубины и диаметров отверстий в кремниевой подложке позволило установить зависимости температуры поверхности от параметров лазера, таких как частота следования и радиус луча, а также зависимости диаметра и глубины отверстия от энергии импульсного излучения.

Ключевые слова: лазерное сверление отверстий, COMSOL Multiphysics, MathCAD, кремниевая подложка.

Современная электроника начинает осваивать производство 3D электронных модулей, способных интегрировать множество микросхем на основе различных технологий в единый корпус. Конструкции 3D модулей на кремниевой подложке обеспечивают электрические межсоединения микросхем с наружными выводами, а также теплоотвод и защиту от окружающей среды [1].

Одно из современных направлений реализации 3D-модулей является технология TSV (Through Silicon Vias – сквозные отверстия в кремнии). Создать отверстий необходимого диаметра с соответствующим уровнем качества традиционными методами крайне затруднительно, а порой и невозможно. Лазерная обработка подложки – один из перспективных методов создания отверстий. При воздействии лазерного излучения на подложку происходит образование отверстия за счет плавления и испарения материала [2].

Моделирование лазерного нагрева неметаллических материалов сводится к нахождению решений системы уравнений, состоящих из дифференциального нелинейного уравне-

ния теплопроводности и нелинейных краевых условий с поверхностным источником теплоты. Этот подход, несмотря на допущения, дает удовлетворительное качественное, а также количественное представление о стадии нагрева. При моделировании импульсного лазерного нагрева необходимо установить зависимости температуры нагрева пластины импульсным лазерным излучением от времени. Для определения этой зависимости используют формулу, которая связывает изменение температуры с параметрами лазерного излучения и свойствами материала [3]:

$$dT = \frac{q \cdot dt}{4\pi \cdot \lambda \cdot \delta \cdot t} \cdot e^{-\frac{r^2}{4at}}, \quad (1)$$

где q – плотности мощности излучения, λ – коэффициент теплопроводности, δ – толщина пластины, r – расстояние от источника теплоты до точки с координатами (x, y) , a – коэффициент температуропроводности.

В этой модели концентрация теплового потока находится в центре излучения, и, удаляясь от него, тепловой поток экспоненциально уменьшается. Математическое уравнение гауссовского распределения теплового потока имеет следующий вид [4]:

$$\Phi = \frac{2P}{\pi r_{\text{лаз}}^2} \times e^{-\frac{2r_{\text{фок}}^2}{r_{\text{лаз}}^2}} \quad (2)$$

где P – мощность лазерного излучения, $r_{\text{лаз}}$ – радиус лазерного излучения.

Кремниевая пластина нагревается лазером, который со временем движется в радиальном направлении. Расстояние от фокальной точки определяется по формуле:

$$r_{\text{фок}} = \sqrt{(x - x_{\text{фок}})^2 + (y - y_{\text{фок}})^2} \quad (3)$$

где $x_{\text{фок}}, y_{\text{фок}}$ – x - y -местоположение лазерной фокальной точки.

Моделирование падающего потока тепла от лазера в качестве пространственно распределенного источника тепла на поверхности позволяет получить термопрофиль кремниевой пластины в зоне формирования отверстия. Распределение температуры по всей пластине зависит от исходных параметров моделирования (табл. 1).

Таблица 1.

Параметры кремниевой пластины и источника лазерного излучения	
Параметры	Значение
Радиус пластины	25,4 мм
Толщина пластины	275 мкм
Удельная теплота испарения	13,68 кДж/г
Коэффициент отражения	0,3
Температура плавления	1414 °С
Плотность	2,33 г/см ³
Радиус лазерного излучения	1 и 2 мм
Длина волны излучения	1,064 мкм
Длительность импульса	0,1 с
Мощность лазерного излучения	30 Вт

Моделирование термопрофилей лазерной обработки отверстий в кремниевой пластине с помощью прикладного программного пакета COMSOL Multiphysics [5,6] позволило получить зависимость максимальной, минимальной и средней температуры пластины от времени (рисунок 1). При уменьшении радиуса лазерного излучения растет температура нагрева в зоне обработки ввиду большей концентрации источника тепла.

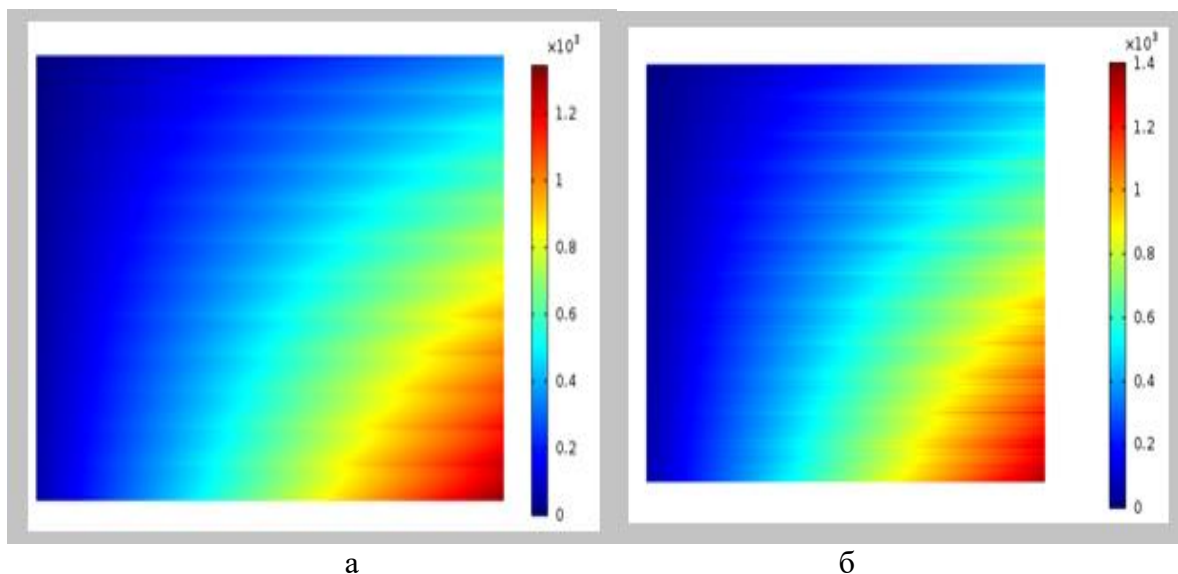


Рисунок 1. Тепловые поля кремниевой пластины при радиусах излучения 2 мм (а) и 1 мм (б)

При моделировании кинетики образования отверстия в непрозрачном материале лазерным излучением глубина h и диаметр отверстия D определяются по формулам [7]:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{D_0}{\tan \gamma}\right)^3 + \frac{3E}{\pi \cdot \tan^2 \gamma \cdot \rho \cdot L_u}} - \frac{D_0}{\tan \gamma}, \quad (5)$$

$$D = \sqrt[3]{D_0^3 + \frac{3E \tan \gamma}{\pi L_u}}, \quad (6)$$

где D_0 – начальный диаметр лунки; $E = P\tau_{и}$ – энергия излучения импульсного ОКГ; P – импульсная мощность; $\tau_{и}$ – длительность импульса; γ – половинный угол раствора светового конуса; L_u – удельная теплота испарения; ρ – плотность материала.

Моделирование глубины и диаметра отверстий при лазерной обработке в кремниевой подложки с помощью прикладного программного пакета MathCAD позволило получить зависимости глубины и диаметра от энергии излучения импульсного ОКГ и половинного угла раствора светового конуса при различных начальных диаметров D_0 , $E = 5$ Дж и исходных данных (таблица 2) (рисунок 2 и 3).

Зависимости глубины h и диаметра отверстия D от энергии импульсного излучения при ее небольшом значении являются близкими к линейным, а их зависимости от половинного угла γ раствора светового конуса являются нелинейными, особенно при больших значениях γ .

Таблица 2

Параметры лазерного излучения импульсного ОКГ	
Начальный диаметр лунки D_0	0,5 – 1,0 мм
Импульсная мощность P	1000 Вт
Длительность импульса $\tau_{и}$	1 – 20 мс
Частота излучения $f_{и}$	5 – 50 Гц
Половинный угол раствора светового конуса γ	1–40°

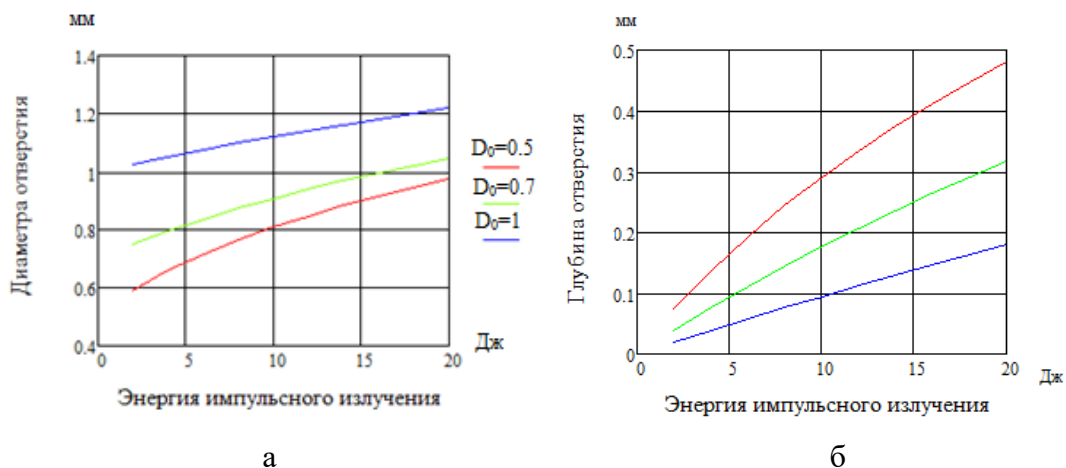


Рисунок 2. Зависимости диаметра (а) и глубины отверстий (б) от энергии импульсного излучения ОКГ при различных начальных диаметрах, $\gamma = 0.5$

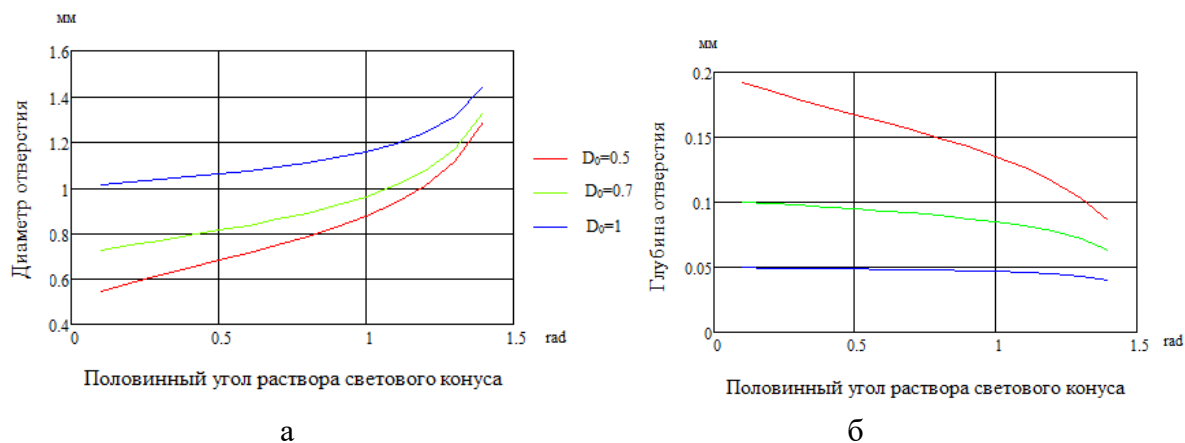


Рисунок 3. Зависимости диаметра (а) и глубины отверстия (б) от половинного угла раствора конуса для различных начальных диаметров

Таким образом, установлено, что значение угла γ , которое зависит от фокусировки лазерного излучения, имеет значительное влияние на глубину и диаметр отверстий при лазерной обработке в кремневых подложках.

Литература

- [1]. Ваньков, В. 3D-модули на основе кремниевых коммутационных плат / В. Ваньков, Н. Комков // Электроника. Наука. Технология. Бизнес, 2017. – № 10(00171). – С. 98–100.
- [2]. Вакс, Е.Д. Практика прецизионной лазерной обработки / Е.Д. Вакс, М.Н. Миленский, Л.Г. Сапрыкин. – М.: Техносфера, 2013. – 696 с.
- [3]. Ланин, В.Л. Эффективность нагрева концентрированными потоками энергии при пайке в электронике // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 2. – С. 17–20.
- [4]. Riahi, M. Experimental and numerical study of heat flux distribution in laser forming of bi-layer sheets / M. Riahi, M. H. Gollo, S. N.A. Kalkhoran // JCARME. – 2014. – Vol. 4. – № 1. – P. 67–79.
- [5]. Красников, Г.Е. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics / Г.Е. Красников, О.В. Нагорнов, Н.В. Старостин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 184 с.
- [6]. Darif M., Semmar N. Numerical Simulation of Si Nanosecond Laser Annealing by Comsol Multiphysics // Proc. of the COMSOL Conference, 2008. – P. 1–6.
- [7]. Вейко, В.П. Сборник задач по лазерным технологиям / В.П. Вейко, Е.А. Шахно. – Изд. 3-е, испр. и дополн. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – С. 39–40.

MODELING OF LASER DIMENSIONAL PROCESSING OF SILICON SUBSTRATES

V.L. LANIN

*Professor of department of the
electronic equipment and technology of the
BSUIR*

Ch.N. DAT

*Master student of the Belarus State University
of Informatics and Radioelectronics*

*Belarus State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus
E-mail: vlanin@bsuir.by*

Abstract. Modeling laser processing profiles and depths and diameters of holes in a silicon substrate in the COMSOL Multiphysics and MathCAD software packages allowed us to determine the dependences of the surface temperature on laser parameters, such as the repetition frequency and radius of the beam, as well as the energy of pulsed radiation.

Keywords: laser drilling holes, COMSOL Multiphysics simulation, MathCAD, silicon substrate.