



УДК 681.518; 666.111/.28

С. П. Малюков, Ю. В. Клунникова, Т. Х. Буй  
Южный федеральный университет

## Моделирование процесса лазерной обработки структуры пленка–сапфир

*Рассмотрена методика исследования процессов лазерной обработки структуры пленка–сапфир с использованием методов численного моделирования, в частности метода конечных элементов. Разработана модель процессов лазерной обработки структуры пленка–сапфир, позволяющая анализировать распределение температуры на поверхности структуры пленка–сапфир при разной скорости сканирования лазерного луча. Моделирование процесса лазерной обработки проводилось с помощью системы ANSYS.*

### Структура пленка–сапфир, лазерная обработка, численное моделирование

За последние годы значительные успехи достигнуты в области лазерной обработки материалов. Лазерный отжиг используется для получения равновесных структур в слоях и пленках. Задача лазерной обработки заключается в том, чтобы обеспечить расположение ионов в области, находящейся ближе к поверхности подложки, и уменьшить количество дефектов структуры [1].

При исследовании процессов лазерной обработки структуры пленка–сапфир наиболее важным является расчет температуры и определение режимов термической обработки, обеспечивающих максимальный отжиг дефектов (вакансий или межузельных атомов), максимальную активацию внедренной примеси и эффективный рост пленки [2].

Современные методы математического моделирования, в том числе прогрессивный метод конечных элементов, позволяют исследовать процессы лазерной обработки материалов, получать результаты, близкие к данным натуральных экспериментов [3]. ANSYS – универсальная программная система конечно-элементного анализа для решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела и механики конструкций, задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей.

Целью работы являлась разработка численной модели процессов лазерной обработки структуры пленка–сапфир в системе инженерного конечно-элементного анализа ANSYS, позволяющей анализировать распределение температуры на поверхности образца при различной скорости сканирования лазерного луча.

Лазерный отжиг пленок  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  представляет несомненный практический интерес, так как является методом создания микроструктур с характерными размерами, которые могут найти широкое применение в тонкопленочных транзисторах, дисплеях, сенсорах [4] и солнечных элементах [5], [6]. В структуру пленка–сапфир входит монокристалл сапфира. Монокристаллы сапфира, полученные по методу горизонтальной направленной кристаллизации, обладают комплексом определенных физических свойств (высокая температура плавления, химическая и радиационная стойкость, высокая твердость и прозрачность), благодаря чему они находят широкое применение в микроэлектронике, квантовой электронике, оптике высокого разрешения и нанотехнологиях [7], [8].

**Методика исследования.** Исследования обработки сапфира и формирования пленок на его поверхности были выполнены на установке (модель LIMO 100-532/1064-U), которая включает в себя инфракрасный Nd:YAG-лазер с фиксирован-

ной длиной волны 1064 нм, длительностью импульса 84 нс и мощностью лазерного излучения 0.1...100 Вт. Эксперименты по получению пленки Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на поверхности сапфира проводились путем обработки пластины сапфира в присутствии воды и 3 %-го раствора FeCl<sub>3</sub> четырьмя прохождениями лазерного луча мощностью 90 Вт [9].

Распределение температур на поверхности структуры пленка–сапфир является одним из основных параметров в процессе лазерной обработки. Для расчета тепловых процессов при обработке структуры пленка–сапфир использовалось уравнение теплопроводности, так как оно позволяет получить зависимости температуры от пространственных координат  $x, y, z$  и от времени  $t$  [10], [11]:

$$\rho C_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q,$$

где  $\rho$  – плотность;  $C_T$  – удельная теплопроводность;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Для того чтобы рассчитать процесс распространения тепла, необходимо кроме дифференциального уравнения теплопроводности задать краевые условия: начальное распределение температуры в теле (начальное условие) и условия теплообмена на границе тела (граничные условия).

Начальное условие является заданием распределения температуры внутри тела в начальный момент времени  $t = 0$ :  $T(x, y, z, 0) = f(x, y, z)$ . На практике обычно принимают равномерное распределение начальной температуры  $T(x, y, z, 0) = T_0$ .

На облучаемой поверхности структуры пленка–сапфир (при  $z = 0$ ) действуют граничные условия третьего рода, определяющие конвекционный теплообмен между окружающей средой и поверхностью заготовки:

$$q_0 = \beta(T_1 - T_0),$$

где  $q_0$  – плотность теплового потока за счет конвекции;  $\beta$  – коэффициент конвекционной теплопередачи, характеризующий интенсивность теплообмена между поверхностью структуры пленка–сапфир и окружающей средой;  $T_1$  – текущая температура;  $T_0$  – температура окружающей среды.

При разработке численной модели лазерной обработки структуры пленка–сапфир были приняты следующие допущения:

- материал является изотропным;
- представление лазерного луча в виде гауссова распределения в моде TEM<sub>00</sub>;

- эффект испарения материала игнорируется;
- процесс передачи тепла описывается только законами теплопроводности и конвекции.

Этапы анализа процесса лазерной обработки структуры пленка–сапфир в системе ANSYS включают в себя: задание свойства материала, создание геометрической модели, генерация сетки конечных элементов и задание параметров симуляции. Для численного решения задачи лазерной обработки структуры пленка–сапфир лазерным лучом был применен тип нестационарного теплового анализа (Transient Thermal), позволяющий учесть характер изменения исследуемых температурных характеристик с течением времени. При моделировании процессов лазерной обработки структуры пленка–сапфир рассматривалась пластина с заданными габаритами 30 × 30 × 2.5 мм с пленкой оксида железа Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной порядка 1 мкм на поверхности сапфира. Расчетная сетка образца составила 41 530 узлов и 16 724 элемента. В таблице приведены основные характеристики сапфира.

Содержание Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	99.99
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	4000
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	1430
Теплопроводность, Вт/(м·К)	5
Коэффициент поглощения, см <sup>-1</sup>	0.3
Температура плавления, К	2327
Твердость по Моосу	9
Прочность, МПа:	
на сжатие	2450
на растяжение	990

**Результаты и обсуждение.** На рис. 1 представлено распределение температуры структуры пленка–сапфир при средней мощности лазерного излучения 90 Вт, скорости сканирования лазерного луча 10 мм/с:  $a$  – через 1 с;  $b$  – через 2 с,  $c$  – через 5 с;  $d$  – через 10 с.

На рис. 2 приведена зона термического воздействия лазерного излучения на структуре пленка–сапфир ( $t \geq 300$  °С).

На рис. 3 получена зависимость максимальной температуры на поверхности структуры пленка–сапфир от скорости сканирования лазерного луча. Видно, что максимальная температура на поверхности структуры пленка–сапфир в процессе лазерной обработки уменьшается с увеличением скорости перемещения лазерного луча. На рис. 4 представлена зависимость максимальной температуры на поверхности структуры

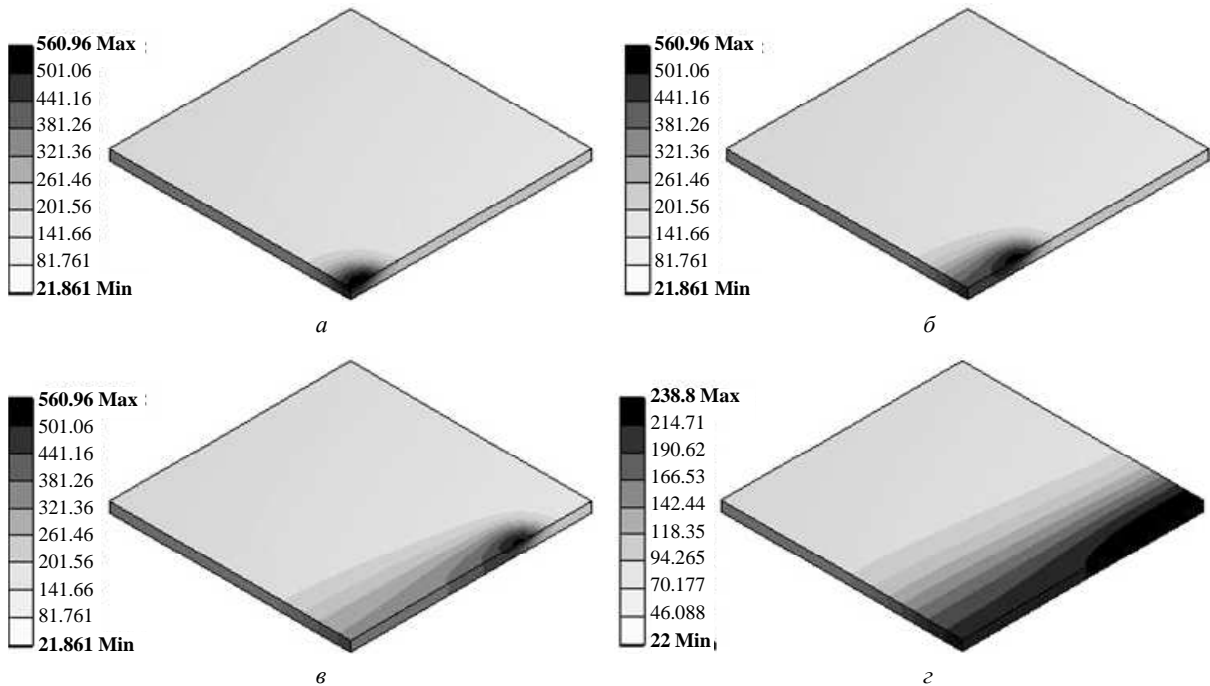


Рис. 1

пленка–сапфир от средней мощности лазерного излучения при разной скорости сканирования [мм/с]: 1 – 1; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15. Температура структуры пленка–сапфир нелинейно зависит от скорости сканирования лазерного луча и линейно зависит от средней мощности лазерного излучения (рис. 3, 4).

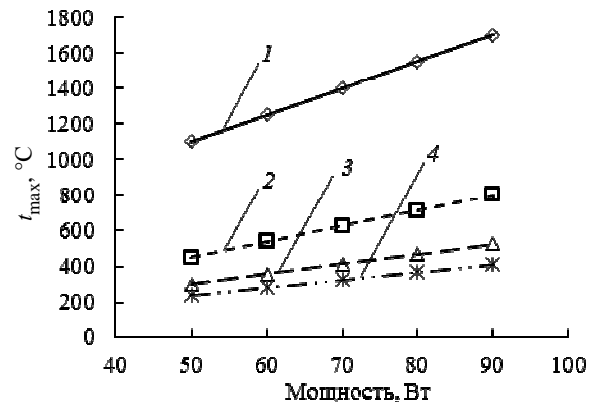


Рис. 4

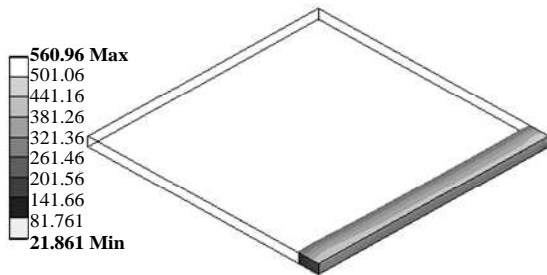


Рис. 2

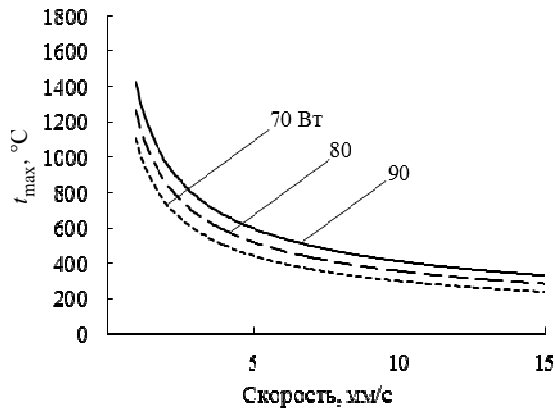


Рис. 3

Исследованы процессы лазерной обработки структуры пленка–сапфир при различных условиях с использованием лазерной установки ЛМО 100-532/1064-У. Разработана нестационарная двумерная численная модель лазерной обработки структуры пленка–сапфир с помощью системы ANSYS. Результаты моделирования показали, что температура структуры пленка–сапфир нелинейно зависит от скорости сканирования лазерного луча и линейно зависит от средней мощности лазерного излучения. В результате моделирования установлено, что при средней мощности лазерного излучения 70...90 Вт со скоростью лазерного луча 5...10 мм/с температура на поверхности составляет порядка 500...600 °С, что является условием, необходимым для роста пленки на

поверхности сапфира и обеспечивающим максимальный отжиг дефектов, а также максимальную активацию внедренной примеси.

Результаты получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра «Ла-

зерные технологии», Центра коллективного пользования и Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов В. В., Долгаев С. И., Шафеев Г. А. Гетероэпитаксиальный рост пленок при лазерном облучении границы раздела «сапфир/поглощающая жидкость» // Докл. АН. 1998. Т. 358. С. 465–469.
2. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.
3. Румянцев А. В. Метод конечных элементов в задачах теплопроводности. Калининград: Изд-во КГУ, 1995. 170 с.
4. Кострин Д. К., Ухов А. А. Датчики в электронных устройствах. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 240 с.
5. Исследование фотоэлектрических преобразователей на основе антимионида галлия в системах беспроводной передачи энергии / В. П. Афанасьев, Е. Г. Лобанова, Д. Н. Редька, А. С. Гришканич // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 8. С. 7–11.
6. Новые люминесцентные стекла и стеклокерамики и перспективы их использования в тонкопленочной солнечной энергетике / В. П. Афанасьев, В. Н. Васильев, А. И. Игнатъев и др. // Оптический журн. 2013. Т. 80, № 10. С. 69.
7. Клунникова Ю. В., Малюков С. П., Саенко А. В. Исследование процессов лазерной обработки материалов для микроэлектроники // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 8. С. 15–19.
8. Cherednichenko D. I., Malyukov S. P., Klunnikova Yu. V. Heat-Physical Processes at the Sapphire Crystals Growth by Horizontal Directed Crystallization // Sapphire: Structure, Technology and Applications. New York: Nova Science Publishers, 2013. P. 101–118.
9. Малюков С. П., Саенко А. В., Клунникова Ю. В. Моделирование процесса лазерной обработки сапфира // Изв. Южного федерального ун-та. Технические науки. 2014. Т. 158, № 9. С. 39–45.
10. Физико-технические основы термических методов исследования свойств материалов и определения толщины покрытий / С. А. Марцынюков, Д. К. Кострин, В. В. Черниговский, А. А. Лисенков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 2. С. 14–21.
11. Либенсон М. Н., Яковлев Е. Б., Шандыбина Г. Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика): конспект лекций. Ч. I: Поглощение лазерного излучения в веществе / под общ. ред. В. П. Вейко. СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2008.

---

S. P. Malyukov, Yu. V. Klunnikova, T. H. Bui

*Southern Federal University*

## SIMULATION OF LASER PROCESSING OF THE STRUCTURE FILM–SAPPHIRE

*The research technique of sapphire laser treatment by use of progressive methods of numerical modeling, in particular finite element method is described in this article. Model of laser treatment of film-sapphire structure was developed. It allows analyzing the temperature distribution on the surface of structure film-sapphire with different laser scanning velocity. ANSYS software was used for simulation of laser treatment process.*

**Structure film–sapphire, laser treatment, numerical simulation**

---