



УДК 539.211; 666.111/28

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

Моделирование процессов лазерной обработки неорганического стекловидного диэлектрика

Рассмотрена методика исследования процессов лазерной обработки неорганического стекловидного диэлектрика для элементов микросистемной техники с использованием методов численного моделирования, в частности метода конечных элементов. Разработана модель процессов лазерной обработки стекловидного диэлектрика, позволяющая анализировать распределение температуры на поверхности боросиликатного стекла при разной скорости сканирования лазерного луча. Моделирование процесса лазерной обработки проводилось в системе анализа ANSYS.

Неорганический стекловидный диэлектрик, лазерная обработка, численное моделирование

Лазерная техника переживает период интенсивного развития [1]–[3]. Широкое применение получили лазеры для обработки материалов практически во всех областях микро- и нанотехнологий, что позволило повысить производительность труда в операциях обработки и контроля, улучшить качество изготовления изделий, обеспечить возможность полной автоматизации технологических процессов [4].

Современные методы математического моделирования, в том числе прогрессивный метод конечных элементов (МКЭ), позволяют проводить исследования процессов лазерной обработки материалов, получать результаты, близкие к данным натуральных экспериментов [5].

При разработке солнечных элементов на основе не кремния, а неорганического стекловидного диэлектрика [6] было выбрано боросиликатное стекло [7] ($B_2O_3-SiO_2-R_2O-RO$, где $R_2O - K_2O, Na_2O, Li_2O$ и $RO - CaO, MgO$), так как подложка из боросиликатного стекла обладает повышенной химической стойкостью (1 по ISO 719), высокой стойкостью к температурному воздействию (температура стеклования $536\text{ }^\circ\text{C}$, температура плавления $1070\text{ }^\circ\text{C}$) и радиационной стойкостью. Наличие оксида бора в данном типе стекла может использоваться для легирования затравочного слоя или поглощающего слоя при создании солнечных элементов. Таким образом, сама конструкция солнечного элемента избавляется от диффузионных барьеров в отношении подложки,

а использование подложки из боросиликатного стекла также заметно удешевляет производство солнечного элемента [8]–[10].

Целью работы была разработка численной модели процессов лазерной обработки неорганического стекловидного диэлектрика, позволяющей анализировать распределение температуры на поверхности заготовки при различной скорости сканирования лазерного луча.

Модель процессов лазерной обработки неорганического стекловидного диэлектрика. Распределение температур на поверхности неорганического стекловидного диэлектрика является одним из основных параметров в процессе лазерной обработки. Для расчета тепловых процессов при обработке неорганического стекловидного диэлектрика использовалось уравнение теплопроводности, так как оно позволяет получить зависимости температуры T от пространственных координат x, y, z и от времени t [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 ρ – плотность; C_T – удельная теплопроводность; λ – коэффициент теплопроводности; Q – мощность внутренних источников тепловыделения.

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 неорганического стекловидного диэлектрика (при $z = 0$) действуют граничные условия третьего рода, определяющие конвекционный теплообмен между окружающей средой и поверхностью заготовки [11]:

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

где β – коэффициент конвекционной теплопередачи, характеризующий интенсивность теплообмена между поверхностью стекла и окружающей средой; T_1 – текущая температура; T_0 – температура окружающей среды.

Для численного решения задачи лазерной обработки стекла лазерным лучом был применен тип анализа Transient Thermal, позволяющий учесть характер изменения исследуемых температурных характеристик с течением времени [12]. При моделировании процессов лазерной обработки неорганического стекловидного диэлектрика рассматривалась пластина с заданными размерами 10×10 мм.

Лазерная обработка материалов основана на том, что использование лазерного излучения позволяет создавать на малом участке поверхности высокие плотности теплового потока, необходимые для интенсивного нагрева или расплавления практически любого материала. При воздействии на поверхность неорганического стекловидного диэлектрика часть потока лазерного излучения отражается от нее, а остальная часть проникает на глубину. Процессы распространения теплоты зависят от интенсивности теплового воздействия и от теплофизических свойств материала [13].

В таблице приведены основные характеристики неорганического стекловидного диэлектрика в виде боросиликатного стекла.

Теплоемкость	750 Дж/(кг·°C)
Плотность	2500 кг/м ³
Коэффициент теплопроводности	1.4 Вт/(м·°C)
Средний коэффициент линейного теплового расширения	$3.3 \cdot 10^{-6}$ К ⁻¹
Температура плавления	1070 °C

При разработке численной модели лазерной обработки неорганического стекловидного диэлектрика были приняты следующие допущения:

- материал является изотропным;
- представление лазерного луча в виде гауссова распределения в моде ТЕМ₀₀;
- эффект испарения материала игнорируется;
- процесс передачи тепла описывается только законами теплопроводности и конвекции.

Начальным этапом разработки численной модели процессов лазерной обработки неорганического стекловидного диэлектрика является моделирование интенсивности мощности теплового источника. Различные формы распределения лазерного луча (гауссово распределение, прямоугольное) могут использоваться при лазерной обработке материалов. Гауссово распределение энергии является наиболее предпочтительным способом лазерной обработки, потому что для него характерен маленький диаметр фокусирующего пятна, в результате чего получается более высокая плотность мощности [14]. Интенсивность лазерного пучка будет представлять собой зависимость вида [15]

$$I(x, y) = I_0 \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{r^2}\right],$$

где I_0 – интенсивность в центре гауссовского пучка; r – начальный радиус гауссовского пучка; x и y – текущие координаты.

Интенсивность мощности лазерного пучка в диапазоне от 10 до 50 МВт/м², падающего на поверхность исследуемого материала, показана на рис. 1. Гауссово распределение лазерного луча приводит к значительному увеличению температуры в зоне воздействия лазерного источника.

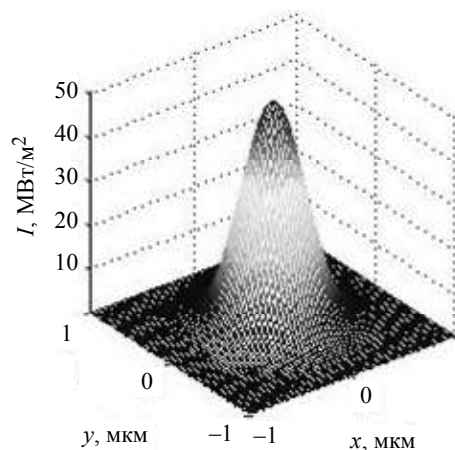


Рис. 1

На основе результатов моделирования интенсивности мощности лазерного луча получено распределение температуры на поверхности бо-

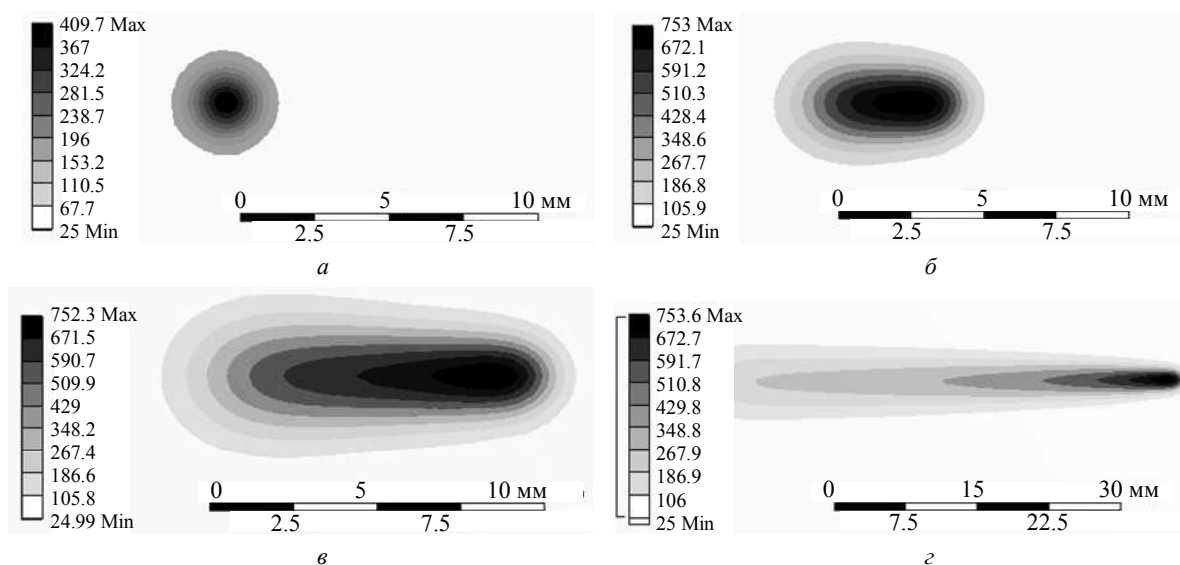


Рис. 2

росиликатного стекла при средней мощности лазерного излучения 25 Вт и скорости 10 мм/с (рис. 2: *а* – через 0.1 с; *б* – через 0.5 с; *в* – через 1 с; *г* – через 5 с). На рис. 2 приведены зоны термического воздействия лазерного излучения на поверхность неорганического стекловидного диэлектрика. Показано, что температурный градиент уменьшается при перемещении лазерного луча, а быстрое охлаждение боросиликатного стекла происходит за счет теплопроводности и конвекции.

На рис. 3 представлена зависимость температуры на поверхности неорганического стекловидного диэлектрика от времени при разной скорости сканирования лазерного луча (1 – 5 мм/с; 2 – 10 мм/с; 3 – 20 мм/с; 4 – 30 мм/с; 5 – 50 мм/с) и показано, сколько времени необходимо для процесса лазерной обработки и в какой момент начинается охлаждение неорганического стекловидного диэлектрика. На рис. 4 получена зависимость максимальной температуры на поверхно-

сти стекла от скорости сканирования лазерного луча. Максимальная температура на поверхности боросиликатного стекла в процессе лазерной обработки уменьшается с увеличением скорости перемещения лазерного луча.

Таким образом, исследованы процессы лазерной обработки поверхности неорганического стекловидного диэлектрика при различных условиях с использованием лазерной установки (ЛМО 100-532/1064-У, длина волны 532 нм). Разработана нестационарная двумерная численная модель лазерной обработки неорганического стекловидного диэлектрика. Результаты моделирования показали, что температура на поверхности подложки нелинейно зависит от скорости сканирования лазерного луча. В результате моделирования установлено, что при средней мощности лазерного излучения 25 Вт со скоростью лазерного луча 10 мм/с температура на поверхности составляет порядка 750 °С. Полученные результа-

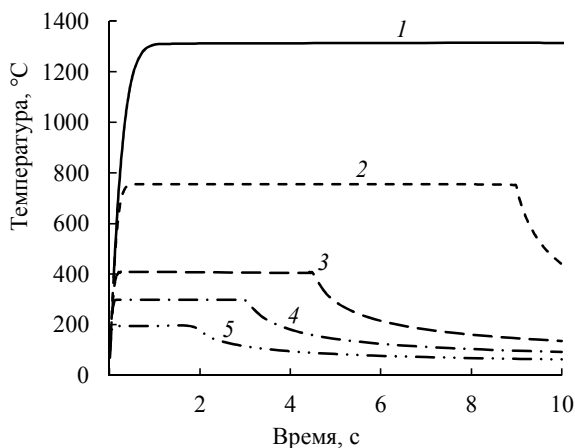


Рис. 3

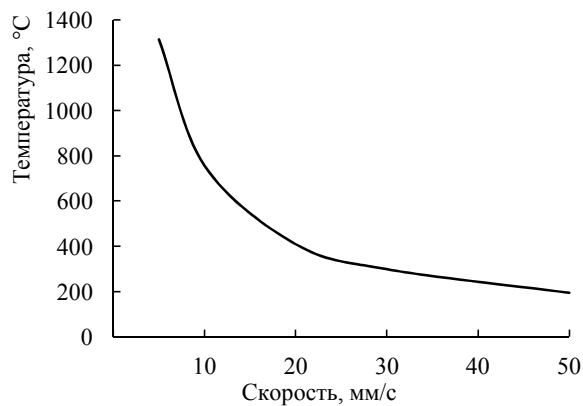


Рис. 4

ты позволяют подобрать оптимальный режим обработки выбранного материала, уменьшить перепад высот и среднюю шероховатость поверхности боросиликатного стекла, которое является перспективным материалом для изготовления солнечных элементов.

Результаты получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра «Лазерные технологии», Центра коллективного пользования и Научно-образовательного центра «Нанотехнологии», Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование фотоэлектрических преобразователей на основе антимолибдатов 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.
2. Марцынюков С. А., Кострин Д. К. Моделирование, разработка и исследование электромагнитной системы для управления мощностью лазера на углекислом газе // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2014. № 1. С. 50–54.
3. Исследование возможности применения лазерной сканирующей системы для создания интраорального стоматологического сканера / М. В. Лавреев, А. А. Ухов, Н. Н. Потрахов и др. // Биотехносфера. 2013. № 5. С. 39–43.
4. Румянцев А. В. Метод конечных элементов в задачах теплопроводности. Калининград: Изд-во КГУ, 1995. 170 с.
5. Andra G., Plentz J. Advances in Multicrystalline LLC-Si Thin Film Solar Cells // Proceedings of 22nd European PVSEC. Milan, 2007. P. 1967–1970.
6. Новые люминесцентные стекла и стеклокерамики и перспективы их использования в тонкопленочной солнечной энергетике / В. П. Афанасьев, В. Н. Васильев, А. И. Игнатьев и др. // Оптический журн. 2013. Т. 80, № 10. С. 69.
7. Ухов А. А., Герасимов В. А., Кострин Д. К. Методика и аппаратура для определения спектральных характеристик стекол и зеркал // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 8. С. 10–14.
8. Клуникова Ю. В., Малюков С. П., Саенко А. В. Исследование процессов лазерной обработки материалов для микроэлектроники // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 8. С. 15–19.
9. Малюков С. П., Куликова И. В., Калашников Г. В. Моделирование процесса лазерного отжига структуры «кремний-стекловидный диэлектрик» // Изв. Южного федерального ун-та. Технические науки. 2011. Т. 120, № 7. С. 182–187.
10. Малюков С. П. Стеклоподобные диэлектрики в производстве магнитных головок. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998.
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.
12. Moaveni S. Finite element analysis: theory and application with ANSYS. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2008.
13. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.
14. Dahotre N. B., Harimkar S. Laser fabrication and machining of materials. New York: Springer Science & Business Media, 2008.
15. Dubey A. K., Yadava V. Laser beam machining – a review // International J. of Machine Tools and Manufacture. 2008. Vol. 48, № 6. P. 609–628.

S. P. Malyukov, Yu. V. Klunnikova, T. H. Bui
Southern federal university

SIMULATION OF INORGANIC GLASSY DIELECTRIC LASER PROCESSING

The methodology of research of inorganic glassy dielectric laser treatment for microsystem technology by use of progressive methods of numerical modeling, in particular finite element method is described in this article. Model of laser treatment of glassy dielectric was developed. It allows analyzing the temperature distribution on the surface of borosilicate glass with different laser scanning velocity. ANSYS software was used for simulation of laser treatment process.

Inorganic glassy dielectric, laser treatment, numerical simulation
