

3. Аксёнов В. П., Погуца Ч. Е. Дисперсия слабых флуктуаций орбитального углового момента гауссова лазерного пучка, «наведённых» атмосферной турбулентностью // Распространение радиоволн, РРВ-24: Труды XXIV Всерос. науч. конф., Иркутск, 2014, Т. 2 С. 104–107.

4. Райцин А. М. Интервальные оценки погрешности определения моментов пространственного распределения лазерного излучения // Измерительная техника. 2012. № 4. С. 27–31.

5. Венцель Е. С., Овчаров Л. А. Задачи и упражнения по

теории вероятностей // М.: Издательский центр «Академия», 2003.

6. Власов С. Н., Петрищев В. А., Таланов В. И. Усреднённое описание волновых пучков в линейных и нелинейных средах (метод моментов) // Известия вузов. Сер. «Радиофизика». 1971. Т. XIV. № 9. С. 1353–1363.

7. Райцин А. М. Измерение отношения двух нормально распределённых случайных величин // Измерительная техника. 2012. № 9. С. 7–11.

Дата принятия: 13.03.2018.

536.425

Модель взаимодействия излучения CO₂-лазера с поверхностью ситалла

И. Н. СКВОРЦОВА¹, С. В. БУЗИЛОВ², В. В. БЕСОГОНОВ¹

¹Институт механики Уральского отделения РАН, Ижевск, Россия

²Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия, e-mail: vbesog@mail.ru

Предложена математическая модель взаимодействия импульсного лазерного излучения с поверхностью ситалла марки СТ-50-1. Учтено распределение энергии в лазерном пучке, рассчитано температурное поле поверхности пластины в области воздействия лазерного пучка. Установлено совпадение расчётных и полученных в процессе эксперимента размеров области плавления.

Ключевые слова: лазерное воздействие, тепловые поля, математическое моделирование.

The mathematical model of interaction of pulse laser radiation with a ST-50-1 glassceramic surface is proposed. In this research energy distribution in a laser beam is considered, the temperature field at a plate surface in the space of a laser beam effect is calculated, comparison of design and experimental values is carried out.

Key words: laser effect, temperature field, mathematical modeling.

Ситаллы – это стеклокерамические материалы на основе стекла, состоящие из большого количества микрокристаллов. Уникальные свойства стеклокерамики, в частности, низкая шероховатость её поверхности, позволяют широко применять эти материалы [1–3]. Поверхности с малыми расстояниями между выступами и впадинами необходимы в микроэлектронике для уменьшения толщины сплошной плёнки без проколов, в производстве зеркал для лазерной и измерительной техники и т. д.

В работах [4–6] в качестве гладкой поверхности предложена подложка из ситалла СТ-50-1, разработанная для формирования на ней тонкоплёночных структур электронных микросхем. Расстояние между выступами и впадинами на поверхности ситалловой подложки после нескольких годов хранения, измеренное сканирующим зондовым микроскопом Solver-P47PRO, составило около 200 нм [6]. С целью уменьшения расстояния между выступами и впадинами до единиц нанометров предложено при финишной обработке воздействовать лазерным излучением на поверхность ситалла и затем охлаждать расплавленный слой отводом теплового излучения в объём материала.

При термической обработке материалов с помощью лазерного излучения в объёме материала формируется нестационарное температурное поле. Данное поле в дальнейшем

определяет качество поверхности и структуру материала в зоне обработки и термовоздействия [7–9]. Расчёт тепловых полей методом вычислительного эксперимента требует решения задач теплопроводности. Известно несколько подходов к решению подобных задач. В области математического моделирования часто используют численные и аналитические решения уравнения теплопроводности [например, 10–12]. Поэтому целью настоящей работы является построение математической модели, адекватно описывающей результаты эксперимента по модификации поверхности ситалла при воздействии на него лазерного излучения.

Экспериментальная установка. В работах [4, 5] представлена экспериментальная установка для обработки поверхности образца из ситалла лазерным излучением с целью получения гладкой поверхности. Импульсный CO₂-лазер формирует пучок монохроматического излучения диаметром 5 мм. Плоские зеркала направляют излучение на фокусирующую линзу, после чего пучок фокусируется на поверхности подложки из ситалла. Поверхность подложки в фокус линзы устанавливается при вертикальном перемещении столика. Плоские зеркала, фокусирующая линза и устройство обдува конструктивно объединены в один узел, называемый «летающей оптикой». Обработка участка

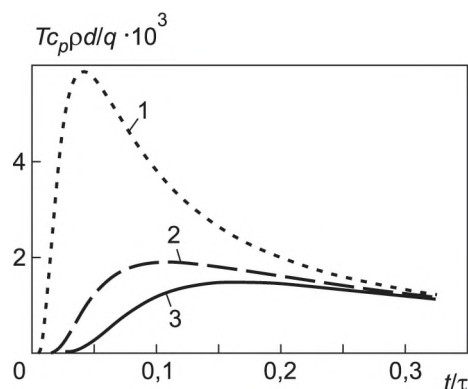


Рис. 1. Зависимость относительной температуры на различной глубине пластины ситалла от относительного времени:
1–3 – $z=d/2$; $3d/4$; d , соответственно

поверхности лазером происходит в соответствии с компьютерной программой, как и управление работой всех узлов установки.

Импульсный CO_2 -лазер имеет следующие параметры: длина волны когерентного излучения 10,6 мкм; максимальные значения мощности пучка 10 Вт, плотности мощности $1,8 \cdot 10^9$ Вт/м², скорости перемещения 180 см/с; гауссово распределение интенсивности излучения с коэффициентом сосредоточенности $6,25 \cdot 10^8$ м⁻². Энергетическая плотность и скорость перемещения лазерного пучка программно варьируются во всём диапазоне 0–100 %.

Математическая модель. При попадании лазерного излучения на поверхность происходят отражение излучения от поверхности ситалла, пропускание излучения и поглощение энергии излучения ситаллом. Поглощение энергии излучения ситаллом сопровождается повышением его температуры, плавлением и испарением. Будем рассматривать два процесса: поглощение поверхностным слоем ситалла энергии лазерного импульса и распространение тепловой энергии от поверхностного слоя в объём ситалловой подложки при заданных начальных и граничных условиях.

Излучение импульсного лазера поступает на поверхность ситалловой пластины неограниченной площади и толщиной d . Будем считать, что воздействие происходит мгновенно, т. е. время взаимодействия излучения с поверхностью не учитывается, как и микрошероховатость поверхности, плотность мощности в

пучке соответствует гауссову распределению. Излучение поглощается поверхностью ситалловой пластины, частично проходит вглубь, при этом плотность потока энергии лазерного излучения на глубине уменьшается по экспоненциальному закону. Распределение температуры по образцу в начальный момент времени пропорционально поглощённой энергии. На поверхности пластины отсутствует теплообмен с внешней средой.

Распределение температуры $T(x, y, z, t)$ (где x, y, z – пространственные координаты; t – время измерений) внутри пластины определяли из решения уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями, соответственно,

$$T(x, y, z, 0) = \frac{q_0(1-R)\alpha}{c_p \rho} e^{-k(x^2+y^2)} e^{-az}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \text{ при } z=0 \text{ и } z=d, \quad (3)$$

где a – температуропроводность; q_0 – энергетическая плотность лазерного излучения в центре; R – коэффициент отражения; α – коэффициент поглощения; k – коэффициент сосредоточенности лазерного луча; c_p – удельная теплоёмкость; ρ – плотность.

Задачу (1) с начальными (2) и граничными (3) условиями решали методом функции Грина [13, 14]. Распределение температуры внутри пластины под действием мгновенного источника имеет вид

$$T = \frac{q}{c_p \rho d} \frac{1}{1+4atk} e^{-\frac{k(x^2+y^2)}{1+4atk}} \times \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha^2 d^2}{(\alpha^2 d^2 + \pi^2 n^2)} \cos \frac{\pi n z}{d} e^{-\frac{\pi^2 n^2 a t}{d^2}} \right), \quad (4)$$

где $q = q_0(1-R)$.

Решение (4) позволяет вычислять закономерности изменения температуры внутри пластины. На рис. 1 приведены расчётные зависимости относительной температуры $Tc_p d / q$ перегрева от относительного времени t/τ (где $\tau = d^2/a$) на различной глубине пластины в центре импульсного воздействия лазерного луча. В зависимости от значения координаты z ,

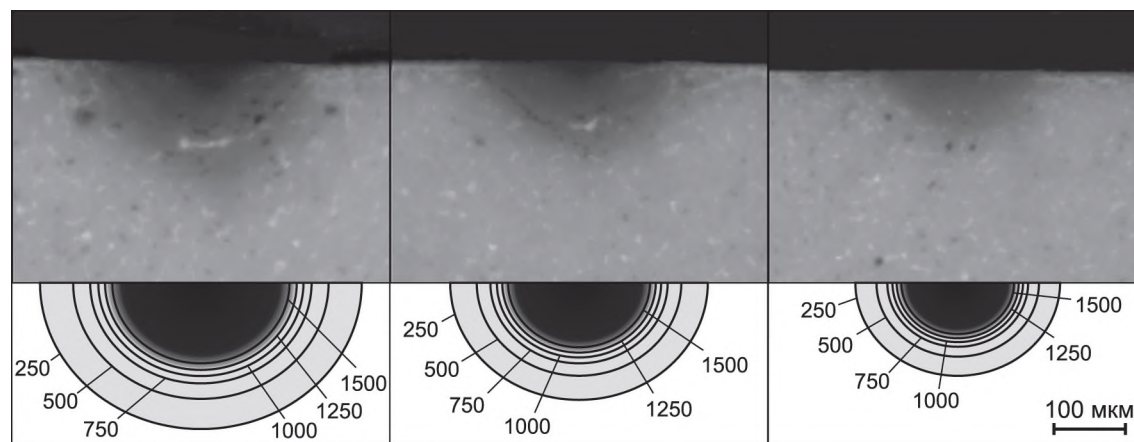


Рис. 2. Поперечное сечение пластины ситалла после импульсного лазерного воздействия: экспериментальные микрофотографии шлифов (вверху) и расчётные кривые с указанием температуры изотерм (внизу)

равной $d/2$; $3d/4$; d , относительно центра пучка температурные максимумы кривых достигаются в разное время. Детальные вычисления по формуле (4) во всех точках исследуемого объёма пластины позволяют определять области перегрева, где регистрируются значения температуры фазовых переходов.

Анализ экспериментальных и расчётных данных. На представленной выше экспериментальной установке было проведено импульсное воздействие на поверхность поликристаллической пластины ситалла СТ-50-1 толщиной $d=1$ мм. Энергия лазерного излучения варьировалась. Расчёты температурных полей выполнены по формуле (4) для экспериментальных значений параметров лазерного излучения. При моделировании использованы следующие значения характеристик ситалла: $a = 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $c_p = 821 \text{ Дж}/(\text{К кг})$; $\rho = 2650 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\alpha = 10^7 \text{ м}^{-1}$. На рис. 2 приведены экспериментальные микрофотографии шлифов (вверху) и расчётные кривые с указанием температуры изотерм (внизу). Плотность энергии лазерного излучения $q = 7,00 \cdot 10^6$; $3,50 \cdot 10^6$; $1,75 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{м}^2$. Микрофотографии шлифов получены на микроскопе OLYMPUS SZ61.

Воздействие лазерного импульса на пластину привело к её плавлению, а последующий быстрый отвод тепла в объём пластины – к охлаждению и аморфизации расплава. Основным технологическим параметром при воздействии лазерного излучения является толщина аморфного слоя на поверхности ситалла, зависящая от энергии лазерного импульса. Температуры стеклования и расплавления для СТ-50-1 равны 760 и 1470 °С, соответственно. На рис. 2 (вверху) наблюдаются области, где произошло изменение структуры материала, т. е. были достигнуты высокие значения температуры. Расчётная модель позволяет по расположению изотерм (см. рис. 2 (внизу)) оценить области плавления объекта исследования. В эксперименте толщина аморфного слоя измерена по нормали к поверхности в центре воздействия лазерного пучка. Погрешность измерений геометрических параметров микроскопом OLYMPUS SZ61 с программным обеспечением составляет 1 мкм. Толщина аморфного слоя определена с доверительной вероятностью 0,95 для 10 измерений. В таблице приведены экспериментальные $d_{a,э}$ и расчётные $d_{a,р}$ значения толщины аморфного слоя на поверхности после лазерного воздействия при различной плотности энергии q . Анализ модельных и экспериментальных результатов показывает их согласование.

Толщина аморфного слоя на поверхности ситалла

$q \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{м}^2$	$d_{a,э}, \text{ мкм}$	$d_{a,р}, \text{ мкм}$
7,00	109±2	110
3,50	80±2	84
1,75	62±2	64

Заключение. Предложенная математическая модель взаимодействия лазерного излучения с веществом позволяет анали-

тически находить размеры области плавления ситалла СТ-50-1 при воздействии лазерного импульса на его поверхность. В результате такого воздействия ситалл подвергается фазово-структурной модификации. Вычисленные и экспериментально полученные размеры области плавления совпадают. Это позволяет сделать вывод о возможности применения предложенной математической модели для оценки размера областей аморфизации.

Л и т е р а т у р а

1. Holand W., Beall G. Glass-Ceramic Technology. The American Ceramic Society. Westerville, 2012.
2. Marghussian V. Nano-Glass Ceramics: Processing, Properties and Applications. Elsevier, 2015.
3. Beall G. H. Design and properties of glass-ceramics // Ann. Rev. Mater. Sci. 1992. V. 22. No. 1. P. 91–119.
4. Бесогонов В. В., Лыс В. Ф., Сковцова И. Н. Наноструктурная модификация поверхности ситалловой подложки воздействием CO_2 -лазерного излучения // Нанотехнологии. 2011. № 5. С. 6–9.
5. Пат. 2463267 РФ. Способ и установка для лазерной обработки поверхности ситалла / В. В. Бесогонов, В. В. Тарасов, И. Н. Сковцова, В. Ф. Лыс // Изобретения. Полезные модели. 2012. № 10.
6. Бесогонов В. В., Сковцова И. Н. Прецизионный контроль топологии поверхности ситалловых подложек СТ-50-1 // Измерительная техника. 2010. № 3. С. 68–69.
7. Engin D., Kirb, K. W. Development of an analytical model for the laser machining of ceramic and glass-ceramic materials // J. Appl. Phys. 1996. V. 80. No. 2. P. 681–690.
8. Вейко В. П., Костюк Г. К., Никоноров Н. В., Яковлев Е. Б. Структурно-фазовая модификация стеклокерамических материалов под действием излучения CO_2 -лазера // Известия РАН. Сер. физическая. 2008. Т. 72. № 2. С. 184–188.
9. Новиков Б. Ю., Вейко В. П. Особенности лазерной фазово-структурной модификации стеклокерамик СТ-50-1 и ФС-1 // Науч.-техн. вестник информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 37. С. 195–201.
10. Quintero F., Varas F., Pou J., Lusquinos F., Boutinguiza M., Soto, R. and Pérez-Amor M. Theoretical Analysis of Material Removal Mechanisms in Pulsed Laser Fusion Cutting of Ceramics // J. Phys. D. 2005. V. 38. No 4. P. 655–666.
11. Беленький В. Я., Трушников Д. Н., Саломатова Е. С. Математическое описание и анализ сварочных высококонцентрированных тепловых источников // Вестник ИжГТУ. 2012. № 3 (55). С. 46–50.
12. Бузилов С. В., Перевозчиков С. М., Пряхин В. В. Тепловое действие лазерного излучения на тонкие металлические пленки // В мире научных открытий. 2010. № 4-4. С. 34–36.
13. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твёрдых тел. М.: Наука, 1964.
14. Полянин А. Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. М.: Физматлит, 2001.

Дата принятия: 04.04.2018.