

ПРИМЕНЕНИЕ ФОКУСАТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НАНОПОРИСТЫХ СТРУКТУР ТВЕРДОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Н.Л. Казанский^{1,2}, С.П. Мурзин¹, В.И. Трегуб¹, А.В. Меженин¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия,

²Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия

Аннотация

Для формирования наноразмерных пористых структур твердокристаллических материалов предлагается использовать метод сублимации более легко испаряющегося компонента сплава типа твердый раствор в сочетании с воздействием лазерным излучением с целенаправленно изменяемым пространственным распределением мощности. Придание обрабатываемым материалам требуемых физико-механических свойств осуществляется лазерной обработкой с использованием фокусаторов излучения. Проведен расчет распределения интенсивности излучения, формируемого фокусатором для лазерной обработки, позволяющей при последующем нагреве материала в безокислительной среде увеличить концентрацию пор и более равномерно распределить их в объеме.

Введение

Использование наноструктурированных материалов в качестве фильтрующих мембран, сорбентов, коагулянтов и катализаторов позволяет существенно улучшить технико-экономические показатели (тонкость, скорость, эффективность, стоимость фильтрации и др.) очистки жидких и газовых сред. Такие материалы находят применение при утилизации углеводородных загрязнений, фильтрации газов и жидкостей в окружающей среде и медицине, синтезе химических соединений с помощью катализаторов, а также в качестве топливных элементов на основе нанопористых структур [1]. В связи с этим значительный научный и практический интерес представляют вопросы создания новых методов формирования наноразмерных пористых структур твердокристаллических материалов, как со сквозными порами, так и в поверхностном слое. Для получения таких структур эффективным является применение метода сублимации более легко испаряющегося компонента сплава типа твердый раствор при высокотемпературном нагреве в безокислительной среде в сочетании с воздействием лазерным излучением с целенаправленно изменяемым пространственным распределением мощности.

Способы обработки лазерным излучением с высокой эффективностью применяются для придания обрабатываемым материалам требуемых свойств. При реализации прогрессивных процессов лазерной обработки с обеспечением высокого качества изделий применяют различные оптические системы преобразования параметров излучения. В работах [2-4] показана возможность формирования структур материалов с улучшением физико-механических свойств за счет создания требуемого пространственного распределения мощности в плоскости обработки с помощью металлооптических фокусирующих систем на основе фокусаторов излучения, обладающих достаточной лучевой стойкостью и высокой надежностью. Отражающие фокусаторы

осуществляют поворот пучка лазерного излучения, его пространственную фазовую модуляцию и перераспределение энергии в различные геометрические фигуры с заданным профилем интенсивности [5, 6].

Целью данной статьи является расчет распределения интенсивности излучения, формируемого фокусатором для лазерной обработки, применяемой при реализации разработанного способа синтеза нанопористых структур твердокристаллических материалов.

Расчет распределения интенсивности при формировании излучения с гауссовским и кольцевым распределением плотности потока

В рамках геометрической оптики задача фокусировки лазерного излучения эквивалентна поиску функций отображения области с координатами (U, V) оптического элемента в область с координатами (x, y) плоскости регистрации, которая строится с помощью лучей, соединяющих между собой точки обеих плоскостей. Для моделирования используются уравнение распространения излучения, проводится расчет лучевых траекторий через оптическую систему от источника до плоскости регистрации. Чем больше лучей проведено через систему, тем точнее результат моделирования.

Проведен расчет распределения интенсивности излучения в фокальной плоскости оптического элемента, форма поверхности которого определяется уравнением:

$$Z(U, V) = \text{mod}_{\bar{m}\lambda/(2 \cdot \cos \theta)} \left(-\frac{U^2 \cdot \cos \theta}{2q} + \frac{V^2}{2p \cdot \cos \theta} + C \right), \quad (1)$$

где $Z(U, V)$ – высота рельефа в точке (U, V) оптического элемента; U, V – координаты точки отражающего оптического элемента в системе координат с осью OU , направленной противоположно

проекции падающего луча и имеющей начало в центре отражающей поверхности; $\text{mod}_{\overline{m}\lambda/(2\cdot\cos\theta)}(\overline{h})$ – функция равная наименьшему положительному остатку от деления \overline{h} на $\overline{m}\lambda/(2\cdot\cos\theta)$; \overline{m} – целое число; λ – длина волны излучения; θ – угол между оптической осью излучения и нормалью к плоскости оптического элемента; p и q – параметры; C – высота микрорельефа в центральной точке фокусатора. Фотошаблон фокусатора CO₂-лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 10,6\cdot 10^{-6}$ м, изготовленного в Институте систем обработки изображений РАН на основе аналитической зависимости (1), представлен на рис. 1. Оптический элемент имеет следующие параметры: фокусное расстояние $f = 0,835$ м, максимальный радиус фокусируемого пучка $R = 17,5\cdot 10^{-3}$ м, угол между оптической осью излучения и нормалью к плоскости фокусатора $\theta = 45^\circ$.

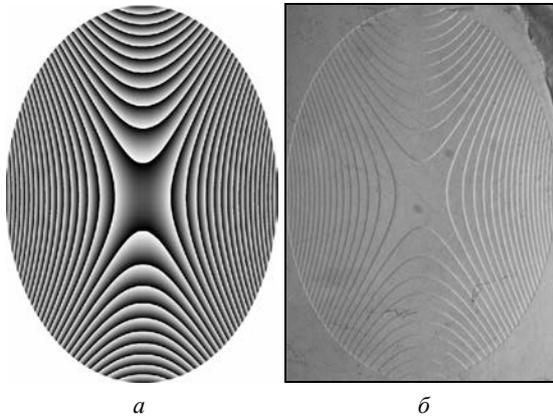


Рис. 1. Фотошаблон (а) и внешний вид (б) фокусатора излучения, выполненного по аналитической зависимости (1) при $\lambda = 10,6\cdot 10^{-6}$ м, $f = 0,835$ м, $R = 17,5\cdot 10^{-3}$ м, $\theta = 45^\circ$

Зная кривизну в каждой точке поверхности, можно определить углы отклонения элементарных лучей при отражении. В данном случае: по координате U происходит расфокусировка излучения, а по координате V – его фокусировка. Каждый элементарный луч в фокальной плоскости (xOy) отклоняется от положения (X, Y), соответствующего его проекции на фокальную плоскость, и пересекает ее в точке с координатами (X_F, Y_F):

$$\begin{aligned} X_F &= X - f \cdot \text{tg} \left(2 \cdot \text{arctg} \left(-\frac{U \cdot \cos \theta}{q} \right) \right), \\ Y_F &= Y - f \cdot \text{tg} \left(2 \cdot \cos \theta \cdot \text{arctg} \left(\frac{V}{p \cdot \cos \theta} \right) \right). \end{aligned} \quad (2)$$

При расчетах проводилась дискретизация расчетной области оптического элемента $Z(U, V)$:

$$\overline{b}_1 = \frac{-\sqrt{2}R(i-1)}{2i}; \overline{b}_2 = \frac{\sqrt{2}R(i-1)}{2i}; \overline{b}_3 = \frac{\sqrt{2}R}{i}, \quad (3)$$

где $\overline{b}_1, \overline{b}_2$ – соответственно нижний и верхний пределы изменения значений U, V ; \overline{b}_3 – шаг дискретизации; $i = 800 \dots 1400$ – целое число.

Область G падения излучения на оптический элемент разбивалась на малые площади ΔG , в которых определялась интенсивность излучения. Соблюдая условие $\Delta F \geq \Delta G$, где ΔF – элементарная (малая) площадь плоскости регистрации, после вычисления координат точки падения луча на плоскость регистрации, определялось распределение интенсивности в требуемом сечении отраженного пучка.

Радиус и параметр распределения интенсивности фокусируемого лазерного излучения с гауссовским распределением плотности потока имели значение: $R_\phi = 14\cdot 10^{-3}$ м, $r_\phi = 12,5\cdot 10^{-3}$ м, где r_ϕ – параметр фокусируемого пучка гауссовского распределения плотности излучения, в котором интенсивность на расстоянии r_ϕ от центра уменьшается в e раз по сравнению с интенсивностью в центре пучка.

Для повышения интенсивности излучения на краях лазерного пятна целесообразно перенести долю энергии от центра фокусатора на те его слои, которые рассчитаны для работы в условиях экспоненциально малой плотности мощности. Перераспределение энергии к периферии лазерного отрезка может быть достигнуто использованием лазерного излучения с кольцевым распределением плотности потока. При проведении расчетов средний радиус лазерного излучения с кольцевым распределением плотности потока принимался равным $R_K = 10^{-2}$ м.

Результаты расчета по формулам (2) распределения приведенной к единице мощности интенсивности излучения \overline{q} вдоль продольной оси светового пятна в фокальной плоскости оптического элемента (1), при формировании излучения с гауссовским и кольцевым распределением плотности потока представлены на рис. 2. При фокусировке таких пучков длина отрезка в фокальной плоскости составляет более $(30 \dots 40)\cdot 10^{-3}$ м, а приведенная к единице мощности интенсивность излучения \overline{q} не превышает значения $1,6\cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$.

Применение лазерного излучения с кольцевым распределением плотности потока при формировании полосовых энергетических источников позволяет выполнить условие неоднородного распределения интенсивности излучения по длине фокального отрезка с максимумом по краям. Воздействие на объекты полосовых движущихся энергетических источников предоставляет возможность обеспечить выравнивание значений максимальных температур в поперечных сечениях зоны термического влияния в ходе термических циклов нагрева и охлаждения, а увеличение плотности мощности лазерного излучения по краям полосы компенсирует повышенный теплоотвод с периферийных участков.

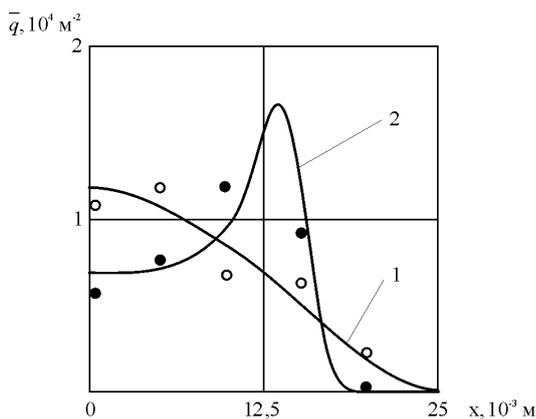


Рис. 2. Распределение приведенной к единице мощности интенсивности излучения \bar{q} вдоль продольной оси светового пятна в фокальной плоскости оптического элемента при формировании излучения с распределением плотности потока:

1 – гауссовским ($R_{\Phi} = 14 \cdot 10^{-3}$ м, $r_{\Phi} = 12,5 \cdot 10^{-3}$ м);

2 – кольцевым ($R_K = 10^{-2}$ м).

— — — — — результаты расчета; ○, ● — эксперимент

Для создания более высокой концентрации энергии на поверхности технологических объектов отражающий оптический элемент, выполненный по аналитической зависимости (1), целесообразно использовать в составе двухфокусаторной системы [7]. Это позволяет также устранить такие недостатки, имеющие место при использовании одиночного вращающегося фокусатора, как значительные изменения фокусного расстояния Δf оптической системы ($\Delta f = (0 \dots 0,5) f$) и увеличение размеров светового отрезка при повороте оптического элемента, приводящее к снижению максимальной и средней интенсивности излучения в фокальной плоскости.

Измерение пространственного распределения интенсивности в лазерном пятне проводилось на CO_2 -технологическом комплексе ЛК-1300 “Хебр-1А” стандартным измерителем мощности, перемещающимся в системе координат, перпендикулярной оси луча, и снабженным квадратной диафрагмой площадью 10^{-8} м². Мощность лазерного излучения при проведении экспериментальных исследований составляла $Q=500$ Вт. Использование оптико-электронного сканирующего инфракрасного радиометра (тепловизора) предоставляет возможность автоматизировать процесс регистрации пространственной структуры излучения.

Для снижения уровня оптических сигналов во избежание необратимых изменений чувствительного элемента датчика целесообразно применять ответвитель лазерного излучения. В этом случае ответвленная часть пучка (1% от полной мощности) направляется на зеркала механизмов кадровой и строчной развертки оптического блока тепловизора. Чувствительная площадка пирометрического приемника лазерного излучения располагается в плоскости, оптически сопряженной с анализируемой, и

работает в режиме термостабилизации – охлаждается жидким азотом. В аналогово-цифровом преобразователе электрические сигналы с приемника излучения преобразуются в цифровые и через устройства ввода-вывода видеоизображения поступают в персональный компьютер для проведения последующей обработки и анализа.

Применение фокусатора излучения при реализации способа формирования наноразмерных пористых структур

Разработан способ формирования нанопористых структур твердокристаллических материалов путем сублимации атомов компонента сплава с более высокой упругостью пара. Перед нагревом материала в безокислительной среде на участки выбранных форм и размеров осуществляется энергетическое воздействие лазерным излучением. Характерные высокие скорости охлаждения в зоне термического влияния металлических материалов обуславливают большую неоднородность и повышенную дисперсность структуры, увеличение плотности дислокаций и других дефектов кристаллической решетки. Предварительная обработка лазерным излучением позволяет формировать мелкодисперсную структуру материалов, что предоставляет возможность увеличить концентрацию пор и более равномерно распределить их в объеме. При лазерной обработке целесообразно принять схему нагрева непрерывным излучением, сфокусированным в световое пятно в виде неподвижного, установленного перпендикулярно траектории движения, или вращающегося отрезка прямой линии [7]. Для создания требуемого пространственного распределения мощности воздействующего потока лазерного излучения используется фокусатор излучения, выполненный по аналитической зависимости (1).

Проведены экспериментальные исследования влияния высокотемпературного нагрева в безокислительной среде на структуру и свойства поверхностного и приповерхностного (глубиной до 10...20 мкм) слоев сплавов типа твердых растворов. Установлено, что такая обработка приводит к уменьшению предела упругости материалов вследствие накопления дефектов в кристаллическом строении за счет сублимации более легко испаряющегося компонента. При использовании способа формирования наноразмерных пористых структур твердокристаллических материалов после изотермической выдержки при определенной температуре зафиксировано уменьшение массы образцов до 1,5...2% и изменение химического состава, т.е. концентрации компонентов сплава в приповерхностном слое. Нагрев в безокислительной среде вызывает изменение рельефа поверхности, который состоит из углублений в виде канавок с клинообразным асимметричным поперечным сечением. На рис. 3 представлена микроструктура приповерхностного слоя образца из сплава Л63 после лазерной обработки с

применением фокусатора излучения и нагрева в безокислительной среде. Поверхность образцов после такой обработки представляла собой слой, обогащенный медью, что установлено результатами спектрографического анализа и рентгенографических исследований фазового состава поверхностного слоя. На рентгенограммах исчезают линии латуни и появляются линии, характерные для меди.



Рис. 3. Микроструктура приповерхностного слоя образца из сплава Л63 после лазерной обработки с применением фокусатора излучения и нагрева в безокислительной среде (увеличение 500): 1 – структура после обработки, 2 – исходная структура.

Заключение

На основании проведенных исследований установлено, что для получения наноразмерных пористых структур твердокристаллических материалов эффективным является применение метода сублимации более легко испаряющегося компонента сплава типа твердый раствор в сочетании с воздействием высокоэнергетическими потоками с целенаправленно изменяемым пространственным распределением мощности. Для придания обрабатываемым материалам требуемых физико-механических свойств целесообразно применить лазерную обработку с использованием фокусаторов излучения.

В результате расчета распределения интенсивности излучения в фокальной плоскости оптического элемента, имеющего фокусное расстояние $f=0,835$ м, установлено следующее. При формировании излучения с гауссовским ($R_\phi = 14 \cdot 10^{-3}$ м, $r_\phi = 12,5 \cdot 10^{-3}$ м) и кольцевым ($R_K = 10^{-2}$ м) распределением плотности потока длина отрезка в фокальной плоскости

составляет более $(30...40) \cdot 10^{-3}$ м, а приведенная к единице мощности интенсивность излучения \bar{q} не превышает значения $1,6 \cdot 10^4$ м⁻². Применение лазерного излучения с кольцевым распределением плотности потока позволяет выполнить условие неоднородного распределения интенсивности излучения по длине полосового энергетического источника с максимумом по краям.

Лазерная обработка с использованием фокусаторов излучения предоставляет возможность формировать мелкодисперсную структуру материалов, что позволяет при последующей сублимации в безокислительной среде увеличить концентрацию пор и более равномерно распределить их в объеме.

Благодарность

Работа выполнена при частичной поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE), ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы)», грантов РФФИ 07-07-97601, 06-07-08074, 07-01-96602 и 07-07-91580-АСП.

Литература

1. Свитцов А.А. Введение в мембранные технологии // М.: ДеЛи принт, 2007. 208 с.
2. Prokhorov A.M., Sisakian I.N., Soifer V.A., Shorin V.P., Mordasov V.I., Murzin S.P. et al. Device for laser treatment of an object // Pat. USA 5, 103, 073. 7.04.1992. Int. cl. B 23 K 26/00.
3. Murzin S.P. Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics // Journal of Advanced Materials, 2003. Vol. 10 №2. P. 181-185.
4. Мурзин С.П. Прогрессивные технологии лазерной обработки материалов. Под ред. В.П. Шорина. // Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2006. 256 с.
5. Golub M.A., Sisakian I.N., Soifer V.A. Infra-red radiation focusators // Optics and lasers in engineering, 1991. Vol. 15. N 5. P. 297-309.
6. Методы компьютерной оптики. Под ред. В.А. Сойфера. // М. Физматлит, 2000. 688 с.
7. Казанский Н.Л., Мордасов В.И., Мурзин С.П. Формирование энергетических потоков при проведении лазерной и комбинированной обработки материалов // Компьютерная оптика, 2003. В. 25. С. 120-125..

APPLICATION OF RADIATION FOCUSATORS FOR NANOPOROUS CRYSTALLINE MATERIALS STRUCTURE FORMATION

N.L. Kazanskiy², S.P. Murzin¹, V.I. Tregub¹, A.V. Mezhenin¹

¹*Samara State Aerospace University (SSAU), Samara, Russia,*

²*Image Processing Systems Institute of the RAS, Samara, Russia*

Abstract:

To form nanoscale porous structures of solid crystalline materials it is proposed to use a sublimation method for more lighter-volatile components of a solid-solution type alloy in combination with laser radiation exposure with systematically variable spatial power distribution. Proper mechanical and physical properties of materials being treated are given by laser processing with the use of radiation focusators. The calculation is performed for radiation intensity distribution being formed by a focusator for laser processing that enables, for material postheating in a non-oxidizing media, to increase concentration of pores and to distribute them more homogeneously in a volume.

Keywords: nanoporous structure, crystalline material, focusing of laser radiation, diffractive optical element, laser action, nanopores formation, sublimation, diffusion

Citation: Kazanskiy NL, Murzin SP, Tregub VI, Mezhenin AV. Application of radiation focusators for nanoporous crystalline materials structure formation [In Russian]. *Computer Optics* 2007; 31(2): 48-51.

Acknowledgements: The research was partly supported by the Russian-American Basic Research and Higher Education Program (BRHE), the Development of Scientific Potential in Higher Education (2006-2008) Departmental Special-Purpose Program and by the RFBR grants Nos. 07-07-97601, 06-07-08074, 07-01- 96602 and 07-07-91580-ASP.

References:

- [1] Svitsov AA. Introduction to membrane technologies [In Russian]. Moscow: DeLi Print, 2007; 208 p.
- [2] Prokhorov AM, Sisakian IN, Soifer VA, Shorin VP, Mordasov VI, Murzin SP, et al. Device for laser treatment of an object. Pat. USA 5, 103, 073. 7.04.1992. Int. cl. B 23 K 26/00.
- [3] Murzin SP. Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics. *Journal of Advanced Materials* 2003; 10(2): 181-185.
- [4] Murzin SP, Shorin VP (ed.). Innovative laser material-processing technology [In Russian]. Samara Scientific Center of RAS Publisher, 2006; 256 p.
- [5] Golub MA, Sisakian IN, Soifer VA. Infra-red radiation focusators. *Optics and lasers in engineering* 1991; 15(5): 297-309.
- [6] Volkov AV, Golovashkin DL, Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Kotlyar VV, Pavelyev VS, Skidanov RV, Soifer VA (ed.), Solovjev VS, Usplenyev GV, Kharitonov SI, Khonina SN. *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements*. New York: John Willey & Sons, Inc., 2002; 784p.
- [7] Kazanskiy NL, Mordasov VI, Murzin SP. Formation of energy fluxes in laser and combined material processing [In Russian]. *Computer Optics* 2003; 25: 120-125.