

ФОРМИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРИСТЫХ СТРУКТУР МАТЕРИАЛОВ

Н.Л. Казанский^{1,2}, С.П. Мурзин², А.В. Меженин², Е.Л. Осетров²

¹ Институт систем обработки изображений РАН, Россия, Самара,

² Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва, Россия, Самара

Аннотация

Определены зависимости угла поворота отрезка в фокальной плоскости, фокусного расстояния и длины фокального отрезка в зависимости от угла поворота подвижного фокусатора, представляющего собой зонное зеркало с рабочей поверхностью в форме гиперболического параболоида. Обоснована целесообразность его применения для реализации лазерного воздействия с целенаправленно изменяемым пространственным распределением мощности. При таком воздействии в приповерхностном слое твердокристаллического материала – латуни Л63 формируется наноразмерная пористая структура, представляющая собой слой, обогащенный медью.

Ключевые слова: подвижный фокусатор, формирование излучения, лазерное воздействие, наноразмерные пористые структуры.

Введение

Области применения наноструктурированных твердокристаллических материалов и изделий из них в различных сферах деятельности значительно расширяются [1-3]. Существующие методы и технологии изготовления таких материалов характеризуются значительными ограничениями по минимальным размерам пор, а сами изделия – низкими механическими свойствами при ударе, изгибе и других деформациях, низкой проницаемостью из-за повышенной толщины при использовании в качестве фильтрующих элементов и высокой стоимостью [4]. В связи с этим значительный научный и практический интерес представляют вопросы создания новых методов наноструктурирования твердокристаллических материалов. Для получения таких структур эффективным является применение метода сублимации более легко испаряющегося компонента сплава [5, 6].

Формирование наноразмерных пористых структур материалов с улучшением физико-механических свойств при лазерном воздействии достигается путем создания определенного пространственного профиля интенсивности излучения в заданной области на поверхности объекта. Для управления профилем интенсивности целесообразно применить подвижный фокусатор излучения в отрезок, форма рабочей поверхности которого представляет собой аналог гиперболического параболоида.

Целью данной работы является исследование параметров фокального отрезка при изменении пространственного положения подвижного фокусатора излучения и разработка рекомендаций для реализации метода создания наноразмерных пористых структур твердокристаллических материалов лазерным воздействием с целенаправленно изменяемым распределением плотности.

Исследование параметров фокального отрезка при формировании излучения подвижным фокусатором

Установлены закономерности изменения фокусного расстояния, длины и угла поворота фокального отрезка при изменении пространственного положения подвижного фокусатора, представляющего собой зонное зеркало, составленное из частей гиперболического параболоида, смещенных по высоте на расстояние $m\lambda/(2\cos\theta)$, где m – целое число, λ – длина волны излучения, θ – угол между оптической осью излучения и нормалью к плоскости оптического элемента. 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 $\theta = 45^\circ$.

Проведен расчет влияния величины угла поворота подвижного фокусатора на изменение угла поворота лазерного пятна в фокальной плоскости, длины фокального отрезка и фокусного расстояния. Принято, что поверхность фокусатора эквивалентна поверхности соответствующего гладкого зеркала. Расчет проводился в следующей последовательности: дискретизация расчетной области оптического элемента; определение границ области излучения, падающего на оптический элемент; вычисление мощности излучения, падающего на элементарную площадку области фокусатора; расчет матрицы значений проекций углов наклона к оптической оси излучения лучей, отразившихся от оптической поверхности; вычисление матрицы значений координат пересечения отразившихся от фокусатора лучей с фокальной плоскостью; определение матрицы значений плотности мощности излучения в расчетной области и ее коррекция с учетом расходимости.

При повороте на угол φ такого оптического элемента происходит поворот лазерного пятна в фокальной плоскости на угол φ_1 , длина лазерного отрезка L уменьшается и изменяется положение фокальной плоскости. В результате аппроксимации расчетных данных полиномами по методу наименьших квадратов были получены выражения, описывающие функциональную связь $\varphi_1(\varphi)$, $f(\varphi)$ и $L(\varphi)$:

$$\varphi_1 = 0,068 \cdot \varphi^3 - 0,318 \cdot \varphi^2 + 1,334 \cdot \varphi, \quad (1)$$

$$f = (19,394 \cdot \varphi^8 - 243,71 \cdot \varphi^7 + 1227,6 \cdot \varphi^6 - 3154,1 \cdot \varphi^5 + 4257,7 \cdot \varphi^4 - 2614,4 \cdot \varphi^3 + 294,83 \cdot \varphi^2 - 132,73 \cdot \varphi + 835,0) \cdot 10^{-3} [\text{м}], \quad (2)$$

$$L = (0,13 \cdot \varphi^6 - 1,22 \cdot \varphi^5 + 3,35 \cdot \varphi^4 - 0,883 \cdot \varphi^3 + 5,0 \cdot \varphi^2 - 0,175 \cdot \varphi + 22,4) \cdot 10^{-3} [\text{м}], \quad (3)$$

где $\varphi \in [0, \pi]$ – угол поворота фокусатора (рад).

Экспериментальные исследования влияния угла поворота подвижного фокусатора на изменение угла поворота лазерного пятна в фокальной плоскости, длины фокального отрезка и фокусного расстояния проведены на лазерном технологическом оборудовании. Использовался CO_2 слаб-лазер ROFIN DC 010 с диффузионным охлаждением и высокочастотной накачкой, предназначенный для промышленного применения в процессах резки или сварки. Выходная мощность лазерной установки регулировалась в диапазоне 100...1000 Вт. Диаметр выходного пучка с гауссовским распределением интенсивности составлял $20 \cdot 10^{-3}$ м, а расходимость – не более $0,15 \cdot 10^{-3}$ рад.

На рис. 1–3 представлены результаты расчета и экспериментальных исследований параметров фокального отрезка при изменении пространственного положения подвижного фокусатора излучения.

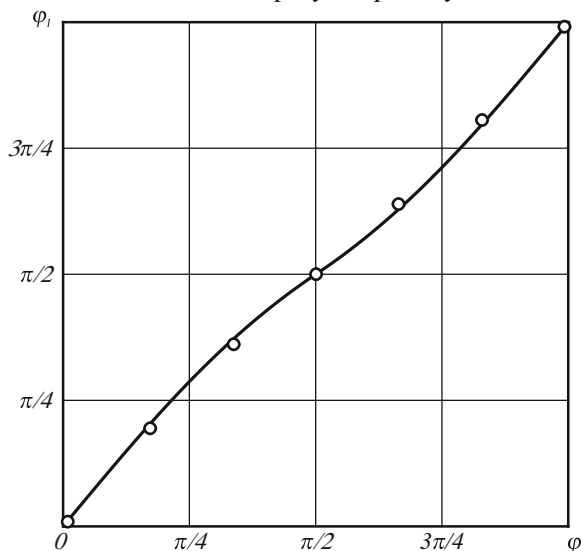


Рис. 1. Зависимость угла поворота фокального отрезка от угла поворота фокусатора

Проведенные исследования позволили обосновать целесообразность применения подвижного фокусатора излучения, представляющего собой зонное зеркало с рабочей поверхностью в форме гиперболического параболоида, для реализации лазерного воздействия с целенаправленно изменяемым распределением плотности мощности.

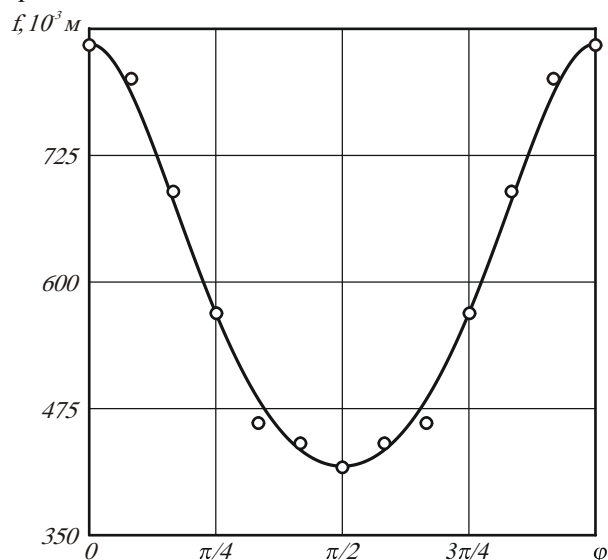


Рис. 2. Изменение фокусного расстояния f при повороте фокусатора на угол φ

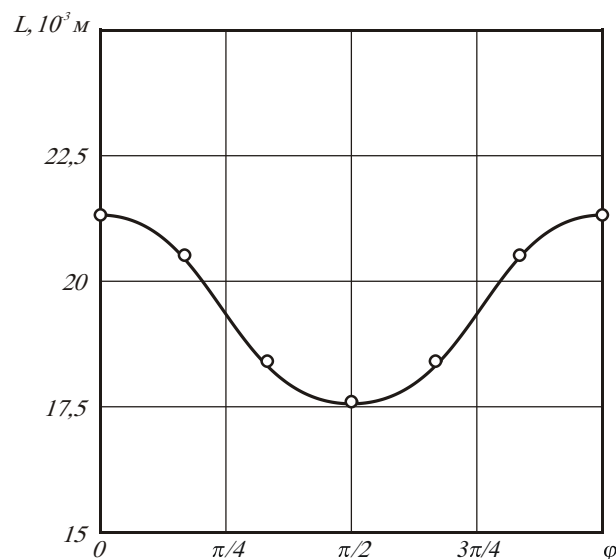


Рис. 3. Зависимость длины фокального отрезка от угла поворота фокусатора. Радиус фокусируемого пучка $R_\varphi = 10 \cdot 10^{-3}$ м

Применение фокусатора излучения при реализации метода создания наноразмерных пористых структур твердокристаллических материалов лазерным воздействием

Проведены экспериментальные исследования влияния лазерного воздействия с целенаправленно изменяемым распределением плотности мощности на структуру приповерхностного слоя глубиной до 10...20 мкм твердокристаллического материала –

латуни Л63. Для исследования были подготовлены образцы размером $70 \times 20 \times 2$ мм. Их поверхность до лазерного воздействия специальной обработке не подвергалась. Образцы либо размещались на подложке из материала с низкой теплопроводностью, либо закреплялись в фиксаторах при минимальной площади контакта с установочным приспособлением.

Нагрев образцов осуществлялся квазинепрерывным лазерным излучением с частотой следования импульсов до 5 кГц. Исследования показали, что при воздействии лазерного излучения мощностью 150...500 Вт наблюдалось покраснение обращенной к излучению поверхности образцов. С увеличением времени воздействия интенсивность окраски поверхности усиливалась. Измерения массы образцов проводились с использованием аналитических весов WA-31 с точностью 0,05 мг. Отмечено уменьшение массы образцов до 0,1...0,2 %.

Проводилось исследование приповерхностного слоя латуни после лазерного воздействия. Подготовка поверхности образца для микроструктурных исследований на инструментальном металлографическом микроскопе МИМ-8 осуществлялась механической обработкой, электролитической полировкой, а также ионным травлением на установке ВУП-2. На рис. 4 представлена микроструктура приповерхностного слоя материала после лазерного нагрева в течение 30 минут. Установлено, что в приповерхностном слое материала формируется наноразмерная пористая структура.



Рис. 4. Микроструктура приповерхностного слоя образца из сплава Л63 после лазерного воздействия (увеличение $\times 1000$): 1 – нанопористый слой; 2 – исходная структура

Установлено, что лазерное воздействие на поверхность твердокристаллического материала вызывает изменение рельефа поверхности. В зависимости от температуры нагрева, времени выдержки и состояния поверхности эти изменения проявляются как в развитии (образовании углублений в виде канавок с клинообразным асимметричным поперечным сечением), так и в сглаживании рельефа.

Рентгеноспектральный анализ проводился с использованием растрового электронного микроскопа РЭМ 100У. Зарегистрировано изменение химического

состава, т. е. концентрации компонентов сплава в приповерхностном слое. Поверхность образцов после обработки представляла собой слой, обогащенный медью, что установлено результатами спектрографического анализа и рентгенографических исследований.

После длительного воздействия лазерного излучения на рентгенограммах исчезают линии латуни и появляются линии, характерные для меди.

Заключение

Проведены исследования параметров фокального отрезка при изменении пространственного положения подвижного фокусатора излучения, представляющего собой зонное зеркало с рабочей поверхностью в форме гиперболического параболоида. При повороте на угол φ такого оптического элемента происходит поворот лазерного пятна в фокальной плоскости на угол φ_1 , длина лазерного отрезка L уменьшается и изменяется положение фокальной плоскости. Проведенные исследования позволили обосновать целесообразность применения подвижного фокусатора излучения для реализации лазерного воздействия с целенаправленно изменяемым распределением плотности мощности.

Проведены экспериментальные исследования влияния лазерного воздействия с целенаправленно изменяемым распределением плотности мощности на структуру приповерхностного слоя твердокристаллического материала – латуни Л63. Показано, что при воздействии лазерного излучения мощностью 150...500 Вт в приповерхностном слое материала формируется наноразмерная пористая структура, представляющая собой слой, обогащенный медью.

Литература

1. Мулдер, М. Введение в мембранную технологию / М. Мулдер; пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 513 с. (M. Mulder. Basic principles of membrane technology. Boston. 1991).
2. Кобаяси, Н. Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси; пер. с японск. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 134 с. (N. Kobayashi. Introduction to Nanotechnology. N.Y. 1999)
3. Перспективные материалы. Т. 1. Структура и методы исследования / под ред. Д.Л. Мерсона. – ТГУ, МИСиС, 2006. – 536 с.
4. Перспективные материалы. Т. 2. Конструкционные материалы и методы управления их качеством / под ред. Д.Л. Мерсона. – ТГУ, МИСиС, 2007. – 468 с.
5. Применение фокусаторов излучения при формировании нанопористых структур твердокристаллических материалов / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.В. Меженин // Компьютерная оптика, 2007. – Т. 31, № 2. – С. 48-51.
6. Мурзин, С.П. Формирование наноразмерных пористых структур твердокристаллических материалов при воздействии лазерного излучения / С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.В. Меженин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2008. – Т.10, №3.

FORMATION OF THE LASER RADIATION TO CREATE NANOSCALE POROUS MATERIALS STRUCTURES

N.L. Kazanskiy^{1,2}, S.P. Murzin², A.V. Mezhenin², E.L. Osetrov²
¹ Image Processing Systems Institute of the RAS, Samara, Russia,
² S. P. Korolev Samara State Aerospace University, Samara, Russia

Abstract

Dependences of a turn corner of a piece in a focal plane, a focal length and length of a focal piece depending on a turn corner mobile focusator, representing a zone mirror with a working surface in the form of a hyperbolic paraboloid, are certain. The expediency of its application for realization of laser influence with purposefully changeable spatial distribution of capacity is proved. At such influence in near-surface layer solid-crystal material – brass Л63, the nanodimensional porous structure representing the layer reached by copper is formed.

Key words: mobile focusator, formation of radiation, laser influence, nanodimensional porous structures.

Citation: Kazanskiy NL, Murzin SP, Mezhenin AV. Formation of the laser radiation to create nanoscale porous materials structures. *Computer Optics* 2008; 32(3): 246-8.

References

- [1] Mulder M. Basic principles of membrane technology [Russian translation]: Moscow: “Mir” Publisher; 1999: 513 p. (M. Mulder. Basic principles of membrane technology. Boston. 1991).
- [2] Kobayashy N. Introduction to Nanotechnology [Russian translation]. Moscow: “BINOM. Laboratoria Znaniy” (Knowledge Laboratory) Publisher; 2007: 134 p. (N. Kobayashy. Introduction to Nanotechnology. N.Y. 1999)
- [3] Merson DL, ed. Promising Materials. Book 1. Structure and Methods of Studies [In Russian]. TGU, MISiS 2006; 536 p.
- [4] Merson DL, ed. Promising Materials. Book. 2. Construction Materials and Quality Control Methods [In Russian]. TGU, MISiS 2006; 468 p
- [5] 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.
- [6] Murzin SP, Tregub VI, Mezhenin AV. Nanoporous structures formation of firm crystalline materials by action of laser radiation [In Russian]. *Proceedings of Samara Scientific Center of the RAS* 2008; 10(3).