Синтез пористых и оксидных наноструктур методом лазерного воздействия с использованием элементов компьютерной оптики

В.А. Данилов
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
Москва, Россия
viktordanilov@bk.ru

***Аннотация* — Рассмотрены особенности синтеза пористых и оксидных наноструктур методом лазерного воздействия. При использовании частотно-модулированного лазерного излучения, синергетический эффект между термическим воздействием лазерного излучения и вызванными импульсно-периодическим лазерным излучением вибрациями приводит к существенному повышению коэффициента диффузии. Это обусловлено нестационарным напряженно-деформированным состоянием обрабатываемого материала. Эффект, получаемый при воздействии лазерного излучения, во многом предопределяется возможностями оптической системы в отношении перераспределения энергии по обрабатываемой поверхности материала с заданной интенсивностью. Существующее многообразие используемых и разрабатываемых вариантов оптических систем демонстрирует наличие широкой заинтересованности специалистов в решении этой важной проблеме. Для осуществления перераспределения интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости, в значительной мере определяющего ход процессов структурообразования в обрабатываемых материалах, является целесообразным использование элементов компьютерной оптики.**

Ключевые слова — синтез; наноструктура; материал пористый, оксидный; система оптическая; компьютерная оптика

1. Введение

В настоящее время для создания наноструктур прогрессивным является метод получения нанопористых структур на основе поликристаллических материалов, разработанный в работах [1–3]. При обработке медно-цинкового сплава на воздухе на поверхности материала формировался слой нанопроволок оксида цинка [4, 5] или гетероструктуры ZnO/CuO [6, 7]. Неизотермичность процессов формирования наноструктур предоставляет возможность эффективного управления, в то время как лазерное излучение является уникальным инструментом для его реализации [8, 9].

Успешное выполнение такого управления возможна только при условии формирования определенного пространственного профиля интенсивности в предварительно заданной области на поверхности материала. В этом случае желаемый результат лазерного воздействия может быть достигнут только при использовании соответствующих систем преобразования параметров излучения, позволяющих реализовать необходимый температурный цикл обработки. Резкльтат воздействия лазерного излучения на материалы в значительной степени определяется способностью оптической системы перераспределять энергию по их поверхности с заданной интенсивностью. Разнообразие используемых и разрабатываемых оптических систем свидетельствует о широком интересе исследователей к этой важной проблеме. Для осуществления перераспределения интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости, в значительной мере определяющего ход процессов структурообразования в обрабатываемых материалах, является целесообразным использование элементов компьютерной оптики [10].

2. Синтез пористых и оксидных наноструктур лазерным воздействием

В соответствии с работами [11–13], для получения нанопористых структур, нагрев поликристаллических материалов в вакууме осуществляется с использованием высокоэнергетических источников теплоты с преднамеренно изменяемым пространственным распределением плотности мощности. Выполнены экспериментальные работы по исследованию влияния процесса нагрева в вакууме на особенности структуры и свойства поверхностного и приповерхностного слоев медно-цинкового сплава до глубины 30…40 мкм. Было установлено, что нагрев в вакууме способствует возникновению изменений в топографии поверхности и элементном составе сплава, т.е. в концентрации составляющих элементов сплава, на поверхности и в приповерхностном слое.

В качестве базового механизма зарождения точечных дефектов, образования нано-, субмикро- и микроразмерных полостей в виде пор в приповерхностном слое и на поверхности обрабатываемого материала выступает сублимация составляющей с более высокой упругостью паров, которой в медно-цинковом сплаве является цинк [14]. После того как происходит сублимация цинка с поверхности, в материале создается градиент его концентрации, и сублимировавший цинк замещается в результате его диффузионной доставки к поверхности. Постепенно с течением времени толщина обедненного цинком слоя увеличивается, и процесс диффузии становиться фактором, ограничивающим возможность осуществления сублимации [15].

Усиление диффузионного массопереноса в твердофазном металлическом материале достигалось за счет возникновения нестационарной локальной упругой деформации, вызванной импульсно-периодическим лазерным высокоэнергетическим внешним воздействием. Установлено, что при внешнем воздействии импульсно-периодического лазерного излучения с частотой от 100 Гц до 5 кГц, применение демпфирующего устройства приводило к уменьшению значений скорости вибрации на порядок, при этом образование нанопор в металлическом материале не происходило. На этом основании сделан вывод, что, если

используется частотно-модулированное лазерное излучение, синергетический эффект между термическим воздействием лазерного излучения и вызванными импульсно-периодическим лазерным излучением вибрациями приводит к существенному повышению коэффициента диффузии [16, 17].

В результате проявления данного синергизма был реализован принципиально новый метод создания наноструктурированных оксиднометаллических материалов лазерным импульсно-периодическим воздействием. Для расширения сферы возможностей использования лазерного воздействия как многообещающего способа повышения массопереноса в твердой фазе металлических материалов необходимо подробное и комплексное освоение принципиально новых открывающихся возможностей, связанных с получением структурированных образований с более лучшими физическими и механическими характеристиками. Обеспечение средств для управления лазерным воздействием на всех локальных участках зоны термического влияния является сложной задачей. Тем не менее, эту задачу можно решить, адаптируя конфигурацию лазерного пучка и перераспределяя плотность потока энергии и мощности с помощью соответствующих оптических систем [18]. Использование элементов компьютерной оптики для перераспределения интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости во многом предопределяет ход процессов структурообразования в обрабатываемых материалах [19].

3. Заключение

Для создания наноструктур используется прогрессивный метод получения в вакууме нанопористых структур поликристаллических материалов. При обработке латуни на воздухе на поверхности материала формируется слой нанопроволок оксида цинка или гетероструктуры ZnO/CuO. Изучен синергетический эффект между термическим воздействием лазерного излучения и вызванными импульсно-периодическим лазерным излучением вибрациями, который обеспечивает существенное повышение коэффициента диффузии в материале. Результат лазерного воздействия на материалы в значительной степени определяется способностью оптической системы перераспределять энергию по их поверхности с заданной интенсивностью. Использование элементов компьютерной оптики для перераспределения интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости во многом предопределяет ход процессов структурообразования в обрабатываемых материалах.

Литература

[1] Kazanskiy, N.L. Synthesis of nanoporous structures in metallic materials under laser action / N.L. Kazanskiy, S.P. Murzin, Y.L. Osetrov, V.I. Tregub // Optics and Lasers in Engineering. – 2011. – Vol. 49. – P. 1264–1267. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2011.07.001.

[2] Murzin, S.P. Exposure to laser radiation for creation of metal materials nanoporous structures / S.P. Murzin // Optics and Laser Technology. – 2013. – Vol. 48. – P. 509–512. DOI: 10.1016/j.optlastec.2012.11.031.

[3] Murzin, S.P. Formation of nanoporous structures in metallic materials by pulse-periodic laser treatment / S.P. Murzin // Optics and Laser Technology. – 2015. – Vol. 72. – P. 48–52. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.03.022.

[4] Murzin, S.P. Creation of zinc oxide based nanomaterials by repetitively pulsed laser treatment / S.P. Murzin, A.I. Safin, M.V. Blokhin // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1368(2). – P. 022004. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022004/

[5] Murzin S.P. Creation of ZnO-based nanomaterials with use synergies of the thermal action and laser-induced vibrations / S.P. Murzin, A.B. Prokofiev, A.I. Safin, E.E. Kostriukov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1096. – P. 012150. DOI:10.1088/1742-6596/1096/1/012150.

[6] Murzin, S.P. Pulse-periodic laser action to create an ordered heterogeneous structure based on copper and zinc oxides / S.P. Murzin, S.A. Afanasiev, M.V. Blokhin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1096. – P. 012139. DOI:10.1088/1742-6596/1096/1/012139.

[7] Murzin, S.P. Formation of ZnO / CuO heterostructure caused by laser-induced vibration action / S.P. Murzin, A.N. Kryuchkov // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 176. – P. 546–551. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.296.

[8] Dickey, F.M. Laser Beam Shaping Applications; 2nd ed. / F.M. Dickey, T.E. Lizotte (Eds.) – Boca Raton, USA: CRC Press Taylor & Francis, 2017. – 442 p.

[9] Lawrence, J.R. Advances in Laser Materials Processing: Technology, Research and Applications; 2nd ed. / J.R. Lawrence (Ed.) – Oxford, UK: Woodhead Publishing, 2017. – 802 p.

[10] Казанский, Н. Л. Оптическая система для проведения селективной лазерной сублимации компонентов металлических сплавов / Н..Л. Казанский, С.П. Мурзин, В.И. Трегуб // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, №4. – С. 481–486.

[11] Мурзин, С.П. Выбор оптической системы для создания нанопористых структур металлических материалов при воздействии лазерного / С.П. Мурзин, Е.Л. Осетров, Н.В. Трегуб, С.А. Малов // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, №2. – С. 219–224.

[12] Мурзин, С.П. Лазерное наноструктурирование металлических материалов с применением подвижных фокусаторов излучения / С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.В. Меженин, Е.Л. Осетров // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, №4. – С. 353–357.

[13] Казанский, Н.Л. Формирование лазерного излучения для создания наноразмерных пористых структур материалов / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, А.В. Меженин, Е.Л. Осетров // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, №3. – С. 246–248.

[14] Мурзин, С.П. Применение фокусаторов излучения для создания металлических нанопористых материалов с высокой удельной площадью поверхности лазерным воздействием / С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.А. Мельников, Н.В. Трегуб // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, №2. – С. 226-232. DOI: 10.18287/0134-2452-2013-37-2-226-232.

[15] Мурзин, С.П. Определение условий интенсификации лазерным воздействием процессов массопереноса в твёрдой фазе металлических материалов / С.П. Мурзин // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, №3. – С. 392–396. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-392-396.

[16] Murzin, S.P. Laser irradiation for enhancing mass transfer in the solid phase of metallic materials / S.P. Murzin // Metals. – 2021. – Vol. 11(9). – 1359. DOI: 10.3390/met11091359.

[17] Murzin, S.P. Arrays formation of zinc oxide nano-objects with varying morphology for sensor applications / S.P. Murzin, N.L. Kazanskiy // Sensors. – 2020. – Vol. 20(19): 5575, 1-19. doi: 10.3390/s20195575

[18] Murzin, S.P. Analysis of the advantages of laser processing of aerospace materials using diffractive optics / S.P. Murzin, N.L. Kazanskiy, C. Stiglbrunner // Metals. – 2021. – Vol. 11(6). – 963. DOI: 10.3390/met11060963

[19] Murzin, S.P. Improvement of thermochemical processes of laser-matter interaction and optical systems for wavefront shaping / S.P. Murzin // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – 12133. DOI: 10.3390/app122312133.