

Термохимические процессы взаимодействия лазерного излучения с веществом для создания квазиодномерных наноматериалов

С.П. Мурзин

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева

Самара, Россия

Венский технический университет

Вена, Австрия

murzin@ssau.ru

Аннотация — Описаны возможности и особенности термохимических процессов взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом и оптических систем для управления пространственным распределением интенсивности излучения. Обладая хорошими способностями фокусировки, лазерное излучение обеспечивает возможность проведения химических реакций, в том числе окисления металлов, локально и с высоким пространственным разрешением. При использовании частотно модулированного лазерного излучения, синергия между тепловыми эффектами лазерных импульсов и вызванными лазерным воздействием вибрациями позволяет значительно увеличить коэффициент диффузии, что стимулируется нестационарным напряженно-деформированным состоянием материала. Применяя дифракционную оптику свободной формы для формирования лазерного излучения возможно осуществлять управление химическими процессами на поверхности материалов.

Ключевые слова — взаимодействие, излучение лазерное, вещество, окисление, материал металлический, формирование излучения, оптика дифракционная

1. ВВЕДЕНИЕ

Важными при взаимодействии лазерного излучения с веществом являются эффекты, которые связаны с химическими превращениями вещества в области интенсивной световой волны [1]. Известно, что лазерное излучение проявляет свойство инициирования химических реакций благодаря термическому влиянию на химически активные среды [2]. При этом большое значение имеют вопросы воздействия лазерного излучения в условиях окислительной среды на металлосодержащие материалы. Процессы окисления в значительной степени влияют на динамику нагрева вследствие существенного изменения поглощающей способности, что соответственно изменяет температурно-временные зависимости, внося в них выраженную нелинейность [3]. Обладая высокой пространственной когерентностью, лазерный луч позволяет добиться хорошей фокусировки, что предоставляет возможность локально и с высоким пространственным разрешением проводить процессы окисления металлических материалов [4]. Проблемы, рассматриваемые в связи с воздействием лазерного излучения, могут быть обусловлены особенностями пространственного и временного распределения температурных полей в химически активных средах [5]. Имеющие место градиенты температур открывают возможности для эффективного управления химическими процессами, при этом лазерное излучение может являться исключительным средством решения данной задачи управления. Эффективная организация подобного управления становится

возможной лишь в том случае, если в заданной области материала формируется соответствующий профиль интенсивности излучения [6, 7].

2. ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ И ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

На основе исследования воздействия на материалы частотно модулированного лазерного излучения в инфразвуковом и звуковом частотных диапазонах, в работах [8, 9] было установлено, что синергия между тепловыми эффектами лазерных импульсов и вызванными лазерным воздействием вибрациями может существенно повысить коэффициент диффузии в металлических материалах. В данном случае нестационарное напряженно-деформированное состояние, обусловленное вызванными лазерным воздействием вибрациями, приводит к интенсификации массопереноса в твердой фазе нагреваемых и селективно окисляемых металлических материалов [10]. На токопроводящей металлической подложке образуются наноструктурированные квазиодномерные оксидометаллические материалы. Использование в оптической системе дифракционной оптики свободной формы [11] для фокусировки лазерного излучения в заранее определенную область на поверхности обрабатываемого материала предоставляет возможность эффективно управлять вышеописанным процессом окисления.

В том случае, когда лазерное излучение больше поглощается целевым продуктом реакции, а непосредственно сама реакция ускоряется вследствие выделения тепла, то в системе устанавливается положительная обратная связь. При этом с повышением концентрации получаемого продукта поглощение будет возрастать. По мере увеличения температуры системы будет наблюдаться самоускорение реакции, то есть термохимическая неустойчивость [12]. Обычно именно таким образом происходит рост оксидных пленок на металлических материалах при нагреве лазерным излучением. Но если, например, продукт реакции поглощает меньше энергии, по сравнению с исходным веществом, то в системе возникает отрицательная обратная связь, вследствие чего химический процесс замедляется и самостабилизируется. При этом поглощенная энергия имеет значение коэффициента передачи обратной связи. Изменяя значение поглощенной энергии возможно управлять происходящими термохимическими процессами [13].

Пространственное распределение энергии в зоне фокусировки имеет важное значение для образования зоны нагрева материала с требуемыми

характеристиками. Высокая монохроматичность и большая длина когерентности лазерного излучения позволяют использовать дифракционную оптику свободной формы для его формирования [14, 15]. Благодаря гибкости компьютерного проектирования и возможностям современных прецизионных технологий изготовления [16, 17] создан уникальный оптический инструмент для заданного формирования лазерного излучения и осуществления необходимого управления реакцией окисления. Синтезированные методами компьютерной оптики дифракционные оптические элементы обеспечивают фокусировку лазерного излучения в заранее определенную фокальную область. Усовершенствованные системы формирования лазерного излучения позволяют гибко управлять термохимическими процессами окисления поверхности металлических материалов.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя частотно модулированное лазерное излучение, было показано, что синергия между тепловыми эффектами лазерных импульсов и вызванными лазерным излучением вибрациями, в основном в звуковом частотном диапазоне, может существенно повысить коэффициент диффузии в обрабатываемых материалах. Определены возможности усиления диффузионных процессов, которые стимулируются вызванными лазерным излучением вибрациями в металлических материалах.

Важнейшей целью управления лазерными термохимическими процессами формирования квазиоднородных наноструктурированных металлооксидов, является предотвращение термохимической нестабильности. Такая нестабильность заключается в положительной обратной связи в системе, которая обуславливает лавинообразное ускорение реакции окисления. Перераспределяя энергию или мощность лазерного излучения, т.е. изменяя величину поглощенной энергии, возможно управлять происходящими термохимическими процессами. Совершенствование систем формирования лазерного излучения на основе дифракционной оптики свободной формы открывает возможность управления термохимическими процессами путем достижения требуемого перераспределения плотности мощности.

На основе достигнутых результатов создаются новые фотонные технологии, нацеленные на получение квазиодномерных наноструктурированных оксидометаллических материалов на плоских проводящих подложках с возможностью управлять морфологией таких структур. Проблема обеспечения возможности управлять термохимической реакцией в зоне лазерного воздействия может быть успешно решена путем формирования лазерного излучения с помощью оптических систем, содержащих элементы дифракционной оптики свободной формы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tveryanovich, Yu.S. Laser-induced processes in chemistry and material sciences / Yu.S. Tveryanovich, A.V.Stolyarov // Russian Chemical Reviews. – 2015. – Vol. 84(10). – P. E01. DOI: 10.1070/RCR4576.
- [2] Kikin, P.Y. Thermochemical processes occurring in a titanium nitride coating under the effect of thermal laser pulses / P.Y. Kikin, V.N. Perevezentsev, E.N. Razov, E.E. Rusin // Inorganic Materials: Applied Research. – 2022. – Vol. 13(3). – P. 614–618. DOI: 10.1134/S2075113322030169.
- [3] Peng, G. Oxidation effect for laser irradiating the metal / G. Peng, H. Yan, F. Liu, Y. Wang, Y. Zheng, Q. Shu // Hongwai yu Jiguang

- Gongcheng/Infrared and Laser Engineering. – 2013. – Vol. 42(5). – P. 1253–1257.
- [4] Veiko, V.P. Physical similarity of the processes of laser thermochemical recording on thin metal films and modeling the recording of submicron structures / V.P. Veiko, Q.D. Nguyen, E.A. Shakhno, D.A. Sinev, E.V. Lebedeva // Optical and Quantum Electronics. – 2019. – Vol. 51(11). – P. 348. DOI: 10.1007/s11082-019-2073-8.
- [5] Hou, J. Analysis of temperature rise of metal targets irradiated by CW laser / J. Hou, C. Liu, C. Jing // Guangdian Gongcheng/Opto-Electronic Engineering. – 2019. – Vol. 46(12). – P. 180659. DOI: 10.12086/oe.2019.180659.
- [6] Möhl, A. Tailored focal beam shaping and its application in laser material processing / A. Möhl, S. Kaldun, C. Kunz, F.A. Müller, U. Fuchs, S. Gräf // Journal of Laser Applications. – 2019. – Vol. 31. – P. 042019. DOI: 10.2351/1.5123051.
- [7] Dev, V. Generation of uniform-intensity light beams with controllable spatial shapes / V. Dev, A.N.K. Reddy, V. Pal // Optics Communications. – 2020. – Vol. 475. – P. 126226. DOI: 10.1016/j.optcom.2020.126226.
- [8] Murzin, S.P. Study of Cu-Zn alloy objects vibration characteristics during laser-induced nanopores formation / S.P. Murzin, A.B. Prokofiev, A.I. Safin // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 176. – P. 552–556. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.297.
- [9] 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(1). – P. 012150. DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012150.
- [10] 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.
- [11] 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. – P. 5575. DOI: 10.3390/s20195575.
- [12] Karlov, N.V. Laser Thermochemistry: Fundamentals and Applications / N.V. Karlov, N.A. Kirichenko, B.S. Luk'yanchuk – Cambridge, UK: Cambridge International Science Pub, 2000. – 371 p.
- [13] Libenson, M.N. Laser-Induced Optical and Thermal Processes in Condensed Matter and Their Mutual Influence / M.N. Libenson, – St. Petersburg, Russia: Nauka Publ., 2007. – 423 p.
- [14] Kazanskiy, N.L. Modeling diffractive optics elements and devices / N.L. Kazanskiy // Proceedings of SPIE. – 2018. – Vol. 10774. – P. 107740O. DOI: 10.1117/12.2319264.
- [15] Khonina, S.N. Iterative approach to solve the inverse diffraction problem under sharp focusing conditions / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy, N.S. Fidirko // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2017. – Vol. 26(1). – P. 18–25. DOI: 10.3103/S1060992X17010040.
- [16] Fomchenkov, S.A. Development of subwavelength diffractive optical elements manufacturing process for photonic devices / S.A. Fomchenkov, A.P. Porfirev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1410(1). – P. 012247. DOI: 10.1088/1742-6596/1410/1/012247.
- [17] Khomutov, V.N. Principles of operation and prospects for the development of laser lithographic systems for the synthesis of optical elements / V.N. Khomutov, R.V. Shimansky, R.K. Nasyrov, V.P. Korolkov // Proceedings of SPIE. – 2021. – Vol. 11875. – P. 118750O. DOI: 10.1117/12.2597050.